

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského**  
**inženýrství**

**Návrh fuzzy systému pro programovatelný automat**  
**S7-1500.**

**Design of Fuzzy System for S7-1500 PLCs**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Pyszko**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika  
Téma: **Návrh fuzzy systému pro programovatelný automat S7-1500**  
**Design of Fuzzy System for S7-1500 PLCs**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

V rámci této diplomové práce bude řešena implementace fuzzy regulátoru pro PLC S7-1500 od firmy Siemens. Fuzzy regulátor bude v PLC realizován pomocí funkčního bloku s definovanou datovou strukturou.

### Body zadání:

1. Sestavení modelu bloku fuzzy regulátoru v prostředí Matlab/Simulink.
2. Převod funkčního bloku z Matlabu/Simulink do programovacího jazyka SCL.
3. Vytvoření funkčního fuzzy bloku v prostředí TIA Portal od firmy Siemens.
4. Sestavení datové struktury fuzzy bloku dle připravené šablony návrhu.
5. Vytvoření testovacího příkladu s fuzzy řízením servo pohonů a 3 fázového motoru pomocí měniče řízeného přes průmyslové rozhraní Profibus.
6. Vytvoření testovacího příkladu s fuzzy řízením servo pohonů a 3 fázového motoru pomocí měniče řízeného přes průmyslové rozhraní Profinet.
7. Zhodnocení dosažených výsledků práce.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VYSOKÝ, Petr. *Fuzzy řízení*. Praha: ČVUT Praha, 1996. ISBN 8001014290/978-8001014295.  
[2] JURA, Pavel. *Základy fuzzy logiky pro modelování a řízení*. Brno, VUTIUM, 2003, 132 s. ISBN 80-214-2261-0/978-8021422612.  
[3] NOVÁK, Vilém. *Základy fuzzy modelování*. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-7300-009-1.  
[4] POKORNÝ, Miroslav a Vilém SROVNAL. *Znalostní systémy řízení - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2012. Dostupné také z: <http://rc112.vsb.cz/nowakova/materials/zsr/ZSR.pdf>.  
[4] POKORNÝ, Miroslav a Vilém SROVNAL. *Systémy s umělou inteligencí - učební text a návody do cvičení*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2012. Dostupné také z: <http://rc112.vsb.cz/nowakova/materials/ssui/SSUI.pdf>.  
[5] REZNIK, Leonid. *Fuzzy Controllers Handbook*. Oxford: Newnes, 1997. ISBN 978-0750634298.  
[6] PASSINO, Kevin M. a Stephen YURKOVICH. *Fuzzy Control*. Addison-Wesley, 1998. ISBN 020118074X/978-0201180749.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vilém Srovnal, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

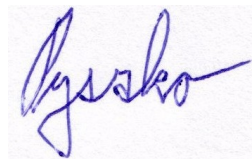


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 29.dubna 2016



.....  
Bc. Tomáš Pyszko

## **Poděkování**

Děkuji Ing. *Vilému Srovnalovi*, Ph.D. za poskytnutou odbornou pomoc a usměrňování během řešení diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá úlohou návržení fuzzy systému pro programovatelný automat S7-1500, který slouží pro řízení technologických procesů.

Práce obsahuje popis a rozbor fuzzy systémů. Jedná se zejména o sestavení fuzzy systémů s třemi vstupy a jedním výstupem typu Takagi-Sugeno a Mamdani, které jsou navrženy v prostředí Matlab/Simulink pomocí Embedded Matlab funkce. Navržený funkční blok je dále pomocí subsystému rozšířen na dvanáct vstupů a čtyři výstupy pro potřeby řízení čtyř regulačních smyček. Fuzzy systémy jsou poté pomocí nástroje Simulink PLC kodéru převedeny do jazyka SCL, který je určen pro programování PLC.

Následně je fuzzy systém typu Takagi-Sugeno nastaven jako fuzzy PSD regulátor pro regulaci teploty tepelné soustavy s a bez chlazení. Nakonec je fuzzy systém typu Takagi-Sugeno nastaven jako expertní systém pro regulaci inverzního kyvadla.

Hlavním cílem této práce je návrh fuzzy systému jak pro účely fuzzy regulace, tak také pro účely expertního řízení.

## **Klíčová slova**

Fuzzy, Regulátor, Expertní systém, Programovatelný automat, TIA portal V13 SP1, Matlab/Simulink R2015b, Automation Studio V3.0.81.

## **Abstract**

This thesis examines the role design fuzzy system for the PLC S7-1500, which is used for process control. Work includes description and analysis of fuzzy systems. These include compilation fuzzy systems with three inputs and one output type Takagi-Sugeno and Mamdani, which are designed in Matlab/Simulink using Embedded Matlab function.

Designed function block is further expanded through subsystem to twelve inputs and four outputs for control four control loops.

Fuzzy systems are then using Simulink PLC Coder transferred to SCL programming language that is designed for PLC programming. Subsequently, the fuzzy type system Takagi-Sugeno fuzzy set as a PSD controller for controlling temperature heating systems with and without cooling. Finally, fuzzy system Takagi-Sugeno type is set as an expert system for controlling the inverted pendulum.

The main objective of this work is to design fuzzy system for the purpose of fuzzy control, as well as for expert control.

## **Key words**

Fuzzy, Controller, Expert system, Programmable logic controller, TIA Portal V13 SP1, Matlab/Simulink R2015b, Automation Studio V3.0.81.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbols a zkratky:

ADD	sčítací člen
A/D	analogově/digitální převodník
AI	analogový vstup
ANSI	americká standardizační organizace
ANFIS	adaptivní neuro-fuzzy inferenční systém
AO	analogový výstup
AS	program určený pro programování PLC
<i>and</i>	Mamdaniho implikace
COG	defuzzifikační metoda středu těžiště
CPU	procesor PLC
D/A	digitálně/analogový převodník
DI	digitální vstup
DO	digitální výstup
FBD	jazyk podobný hradlovým schémátům
GA	genetický algoritmus
HMI	rozhraní člověk-stroj
HW	fyzické vybavení
IDE	vývojové prostředí
ITAE	kritérium kvality regulace
IEC	mezinárodní elektrotechnická komise
$K_p$	zesílení
M	měřítka
Matlab	maticová laboratoř
MISO	obvod s více vstupy a jedním výstupem
MIMO	obvod s více vstupy a více výstupy
MUL	násobící člen
MF	vstupní a výstupní funkce příslušnosti
NUM	počet vstupních funkcí příslušnosti
NORM	fuzzy norma
NB	negativní velká hodnota
NM	negativní střední hodnota
NS	negativní malá hodnota
OB	organizační blok
PID	proporcionální-integrační-derivační regulátor
PLC	programovatelný automat
PSD	proporcionální-sumační-diferenční regulátor
PS	pozitivní malá hodnota
PM	pozitivní střední hodnota
PB	pozitivní velká hodnota

<i>prod</i>	Larsenova implikace
LAD	jazyk liniových schémat reléové logiky
LQR	lineárně-kvadratický regulátor
Simulink	vývojové prostředí blokových schémat
SP	opravný balíček
ST	vyšší programovací jazyk
STL	jazyk nižší úrovně
SUB	odečítací člen
SW	programové vybavení
TIA portal	program určený pro programování PLC
$T_i$	integrační časová konstanta
$T_d$	derivační časová konstanta
$T_{vz}$	vzorkovací perioda
ZO	nulová hodnota



## Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. POPIS FUZZY SYSTÉMŮ .....</b>	<b>2</b>
2.1 Fuzzy logika = výpočty se "slovy" .....	2
2.2 Struktura fuzzy systému .....	2
2.3 Báze pravidel .....	5
2.4 Vyhodnocovací fuzzy systémy .....	6
2.5 Báze dat .....	10
<b>3. VYTVOŘENÍ MODELU BLOKU FUZZY SYSTÉMU .....</b>	<b>12</b>
3.1 Struktura navržených fuzzy systémů .....	12
3.2 Simulink PLC Coder .....	14
<b>4. TESTOVÁNÍ FUZZY PSD REGULÁTORU TAKAGI-SUGENO NA TEPELNÉ SOUSTAVĚ V PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK .....</b>	<b>16</b>
4.1 Vývojové prostředí Matlab/Simulink R2015b .....	16
4.2 Zjištění přenosu tepelné soustavy .....	16
4.3 Fuzzy PSD regulátor typu Takagi-Sugeno .....	21
4.4 Zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru .....	24
<b>5. TESTOVÁNÍ FUZZY PSD REGULÁTORU TAKAGI-SUGENO NA TEPELNÉ SOUSTAVĚ V PROSTŘEDÍ TIA PORTAL .....</b>	<b>30</b>
5.1 Vývojové prostředí TIA portal V13 SP1 .....	30
5.2 HW konfigurace .....	30
5.3 Program .....	31
5.4 Porovnání průběhů regulované veličiny .....	32
5.5 Diagnostika fuzzy PSD regulátoru .....	33

<b>6. TESTOVÁNÍ FUZZY PSD REGULÁTORU TAKAGI-SUGENO NA TEPELNÉ SOUSTAVĚ S CHLAZENÍM V PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK</b>	<b>34</b>
6.1 Zjištění přenosu tepelné soustavy pro ohřev.....	34
6.2 Zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru pro ohřev .....	36
6.3 Zjištění přenosu tepelné soustavy pro chlazení.....	36
6.4 Zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru pro chlazení.....	37
6.5 Fuzzy PSD regulátor typu Takagi-Sugeno.....	37
<b>7. TESTOVÁNÍ FUZZY PSD REGULÁTORU TAKAGI-SUGENO NA TEPELNÉ SOUSTAVĚ S CHLAZENÍM V PROSTŘEDÍ TIA PORTAL</b>	<b>40</b>
7.1 Popis programovacího prostředí SINAMICS StartDrive (TIA portal).....	40
7.2 HW konfigurace .....	40
7.3 Program.....	40
7.4 Porovnání průběhů regulované veličiny .....	41
<b>8. TESTOVÁNÍ EXPERTNÍHO SYSTÉMU TAKAGI-SUGENO NA INVERZNÍM KYVADLE V PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK</b>	<b>43</b>
8.1 Identifikace modelu inverzního kyvadla .....	43
8.2 Adaptivní neuro-fuzzy inferenční systém (ANFIS).....	46
8.3 Fuzzy expertní systém typu Takagi-Sugeno.....	47
<b>9. TESTOVÁNÍ EXPERTNÍHO SYSTÉMU TAKAGI-SUGENO NA INVERZNÍM KYVADLE V PROSTŘEDÍ B&amp;R AUTOMATION STUDIO</b>	<b>50</b>
9.1 Vývojové prostředí B&R Automation Studio V3.0.81 .....	50
9.2 HW konfigurace .....	50
9.3 Program.....	51
<b>10. ZÁVĚR</b>	<b>53</b>

<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>55</b>
--	-----------

<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>56</b>
---------------------------	-----------

## Seznam ilustrací

1 Bloková struktura fuzzy systému .....	3
2 Inference pro dvourozměrný případ, dvě pravidla a Mamdaniho implikaci .....	7
3 Takagi-Sugeno fuzzy mechanismus.....	8
4 Tsukamoto fuzzy mechanismus .....	9
5 Průběh trojúhelníkové funkce příslušnosti.....	10
6 Průběh lichoběžníkové funkce příslušnosti.....	11
7 Funkční bloky navržených fuzzy systému typu Mamdani a Takagi-Sugeno.....	13
8 Podporovaná vývojová prostředí (IDE) .....	14
9 Embedded MATLAB jako podmnožina funkcí MATLABu .....	15
10 Automatické generování kódu z Embedded MATLABu.....	15
11 Proces převodu pomocí Simulink PLC kodéru .....	15
12 Foto regulačního obvodu.....	16
13 Princip fyzikálního modelu .....	16
14 Průběh regulované veličiny v čase .....	17
15 Zjištění přenosu tepelné soustavy .....	19
16 Schéma pro porovnání signálů.....	20
17 Průběhy měřeného a simulovaného signálu .....	20
18 Funkce příslušnosti vstupu $e$ (platí také pro vstupy $\Delta e$ a $\Delta^2 e$ ).....	23
19 Funkce příslušnosti výstupu .....	24
20 Diagram vykonávání genetického algoritmu .....	26
21 Průběhy výpočtu genetického algoritmu.....	27
22 Schéma regulačního obvodu tepelné soustavy .....	28
23 Průběh teploty tepelné soustavy.....	29
24 HW konfigurace .....	31
25 Přechodová charakteristika tepelné soustavy .....	32

26 Porovnání přechodových charakteristik tepelné soustavy .....	33
27 Foto regulačního obvodu.....	34
28 Průběh regulované veličiny v čase .....	34
29 Průběh regulované veličiny v čase.....	36
30 Schéma regulačního obvodu tepelné soustavy pro ohřev .....	38
31 Průběh teploty tepelné soustavy s chlazením - fáze ohřevu.....	38
32 Schéma regulačního obvodu tepelné soustavy pro chlazení .....	39
33 Průběh teploty tepelné soustavy s chlazením - fáze chlazení.....	39
34 Schéma komunikace .....	40
35 Přechodová charakteristika tepelné soustavy s chlazením - fáze ohřevu.....	42
36 Přechodová charakteristika tepelné soustavy s chlazením - fáze chlazení.....	42
37 Model inverzního kyvadla.....	43
38 Model inverzního kyvadla v Simulinku .....	46
39 Funkce příslušnosti vstupu - dráhy .....	48
40 Funkce příslušnosti výstupu - síly.....	48
41 Schéma regulačního obvodu inverzního kyvadla v Simulinku .....	49
42 Průběhy úhlu, uhlové rychlosti, dráhy a rychlosti inverzního kyvadla v Simulinku .....	49
43 Schéma komunikace .....	51
44 Diagram pro regulaci inverzního kyvadla.....	52

## Seznam tabulek

1 Hodnoty regulované veličiny .....	18
2 Mapování vstupů na výstup .....	22
3 Parametry regulačního děje.....	33
4 Využitá část telegramu 352 v programu .....	41
5 Složení řídicího slova STW1 .....	41
6 Porovnání reálných a simulovaných dat - fáze ohřevu .....	42
7 Porovnání reálných a simulovaných dat - fáze chlazení .....	42

# 1. Úvod

Diplomová práce se zabývá návrhem fuzzy systému typu Takagi-Sugeno a Mamdani.

Fuzzy (z angl. neurčitý) je fuzzy logikou, která se zabývá neurčitým popisem technologického procesu. Fuzzy systémy pracují s vágními pojmy jako jsou např. pojmy regulační odchylka je malá, střední nebo velká a i přes dané vágní údaje jsme schopni řídit pomocí fuzzy logiky daný proces úspěšně.

Diplomová práce se dělí na deset kapitol. První dvě kapitoly jsou teoretickou částí, následující kapitoly jsou praktickou částí diplomové práce. Popis jednotlivých kapitol je shrnut v následujících odstavcích.

V druhé kapitole je popsána problematika fuzzy systémů. Je zde popsána struktura fuzzy systémů, dále jsou zde popsány typy fuzzy systémů.

V třetí kapitole je uvedeno, proč byl zvolen diskrétní fuzzy systém typu Takagi-Sugeno. Je zde popsán návrh regulátoru v prostředí Matlab/Simulink R2015b a funkční bloky, které reprezentují fuzzy systémy typu Mamdani a Takagi-Sugeno a popisuje se zde proces generování strukturovaného textu pomocí Simulink PLC kodéru v2.0. Strukturovaný text zde představuje programovací jazyk dle normy IEC 61131.

Čtvrtá kapitola popisuje testování fuzzy PSD regulátoru Takagi-Sugeno v prostředí Matlab/Simulink R2015b. Je zde popsána identifikace regulované soustavy pro ohřev, nastavení báze dat fuzzy PSD regulátoru a průběhy simulace dané regulované soustavy.

Pátá kapitola popisuje návrh programu v prostředí TIA Portal V13 SP1 pro programovatelný automat S7-1500. Je zde popsáno členění programu a jsou zde zobrazeny přechodové charakteristiky naměřené na dané regulované soustavě.

Šestá kapitola popisuje testování fuzzy PSD regulátoru Takagi-Sugeno v prostředí Matlab/Simulink R2015b. Je zde popsána identifikace regulované soustavy pro ohřev a chlazení a jsou zde uvedeny průběhy simulace dané regulované soustavy.

Sedmá kapitola popisuje návrh programu v prostředí TIA Portal V13 SP1 pro programovatelný automat S7-1500. Je zde popsáno členění programu a uvedeno složení telegramu 352, který slouží pro řízení asynchronních motorů pomocí měničů SINAMICS G prostřednictvím PLC.

Osmá kapitola popisuje testování expertního systému Takagi-Sugeno v prostředí Matlab/Simulink R2015b. Je zde uveden matematický model inverzního kyvadla a návrh expertního systému pomocí struktury ANFIS.

Devátá kapitola popisuje testování expertního systému Takagi-Sugeno v prostředí Automation studia. Je zde uveden popis programu a vývojový diagram pro ovládání inverzního kyvadla.

Desátá kapitola je závěrečným shrnutím kapitol předcházejících.

## 2. Popis fuzzy systémů

### 2.1 Fuzzy logika = výpočty se "slovy"

Diplomová práce pojednává o návrhu fuzzy systémů. Problematika fuzzy systémů se zabývá neurčitým popisem daného systému. Hlavním úkolem nasazení fuzzy systému je nahrazení člověka v procesu, kde se uplatňuje vyhodnocovací mechanismus (inferenční mechanismus). Fuzzy systém je matematický systém, který analyzuje analogové vstupní veličiny a pomocí fuzzy logiky generuje akční zásah. Fuzzy systém (řídící systém) je tedy založen na fuzzy logice. Důležitým pojmem ve fuzzy logice je logický výrok. Logickým výrokem mohou být např. výroky: teplota je nízká, tlak je střední, průtok je vysoký atd. Fuzzy logikou je myšleno ohodnocení logických výroků stupněm příslušnosti z intervalu 0 až 1. V klasické teorii se logické výroky ohodnocují buď jako 0 = nepravdivý nebo 1 = pravdivý. Fuzzy logika tak provádí výpočty se "slovy", tzn. používá ve výpočtech "slova" namísto čísel. Existují dva hlavní důvody pro daný přístup. Za první, výpočty se "slovy" jsou nutné, pokud jsou vstupní informace nepřesné a za druhé, když jsou ve vstupních informacích tolerance vůči nepřesnosti, které mohou být využity k dosažení ovladatelnosti, robustnosti a nízkým nákladům [2].

Cílem diplomové práce je navrhnout fuzzy systém pro programovatelný automat Simatic S7-1500. Firmou Siemens nebyl pro programovatelný automat S7-1500 navržen fuzzy systém ani nebylo vytvořeno programové prostředí pro jeho návrh. Takovým prostředím je myšleno prostředí podobné Fuzzy Control++, které slouží pro návrh fuzzy systému určenému pro programovatelný automat Simatic S7-300. Úkolem bylo navrhnout "kostru" fuzzy systému, která se poté naplní daty. Daný fuzzy systém musí být robustní a pokud možno přenositelný na jiný hardware. Tomuto požadavku nejlépe vyhovuje navržení fuzzy systému v prostředí Matlab/Simulink. Dané prostředí má také další výhodu a tou je možnost simulace. Návrh fuzzy systému se zde provádí v Embedded Matlab funkci, která se programuje pomocí Embedded Matlab kódu, který využívá syntaxi jazyka C.

### 2.2 Struktura fuzzy systému

Fuzzy systém se skládá z modulů. Vstupní modul se skládá z bloků normalizace a fuzzifikace. V bloku normalizace se provádí přepočítání vstupních hodnot na rozsah regulované veličiny. Takto normalizovaná data vstupují do bloku fuzzifikace. V bloku fuzzifikace se každé ostré hodnotě z normalizovaného rozsahu přiřadí stupeň příslušnosti do jedné nebo více fuzzy množin odpovídajících významu základních jazykových proměnných použitých v pravidlech.

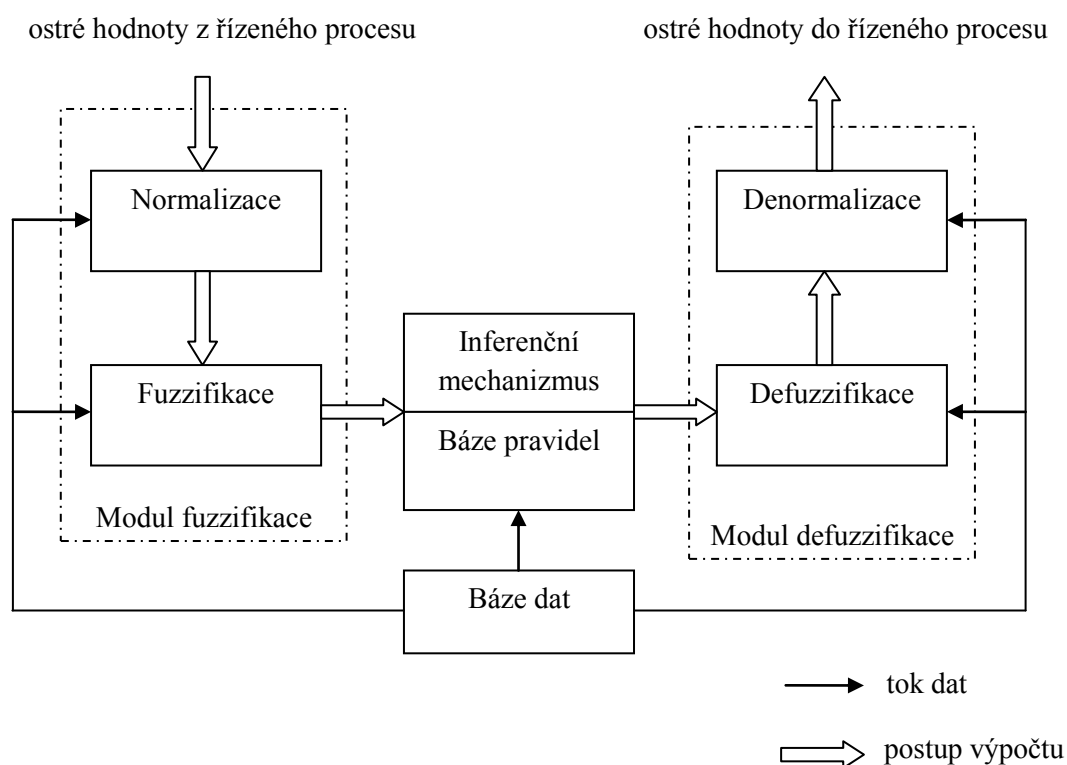
Fuzzifikovaná hodnota poté vstupuje do bloku sestávajícího se z inferenčního mechanismu a báze pravidel. Inferenční mechanismus pracuje nad bází pravidel a na základě znalostí experta (popř. znalostí struktury regulátoru) určí slovní hodnoty akčních veličin.

Výstupem inferenčního mechanismu je fuzzy množina, která vstupuje do bloku defuzzifikace, kde se převede na ostrou hodnotu. Defuzzifikace vlastně spočívá v nalezení vhodného zobrazení, které přiřazuje číslo funkci příslušnosti výstupní fuzzy množiny.



Ostrá hodnota musí mít fyzikální rozměr, proto je nutné ji pomocí bloku denormalizace převést na patřičný rozsah. Aby tyto bloky splňovaly svou funkci, tak je musíme naplnit daty a k tomu slouží tzv. báze dat. V bázi dat se definují rozsahy pro bloky normalizace a denormalizace a dále se zde definují funkce příslušnosti pro bloky fuzzifikace a defuzzifikace.

Pro bázi pravidel poskytuje báze dat data v podobě operátorů. Struktura fuzzy regulátoru je blokově naznačena na obr. 1 [3].



Obr. 1 Bloková struktura fuzzy systému

Z předchozího odstavce vyplývá, že vlastní fuzzifikace je procedura převádějící vstupní normalizovaná data regulátoru na fuzzy množinu. Tato fuzzy množina se pak stává antecedentem (význam bude uveden dále) fuzzy pravidel [1].

Báze dat a báze pravidel se nazývá znalostní bázi. Datová báze obsahuje informace o fuzzy množinách (funkcích příslušnosti), které reprezentují slovní hodnoty jednotlivých jazykových proměnných. Při návrhu fuzzy systému je proto třeba v bázi dat nadefinovat funkce příslušnosti. Báze pravidel obsahuje všechna pravidla potřebná pro dostatečnou jazykovou aproximaci závislosti mezi vstupem (vstupy) a výstupem (výstupy) fuzzy systému. Jednotlivá pravidla jsou ve tvaru [1], [3]:

*if* (stav procesu) *then* (akční zásah do procesu)

Část *if* tohoto pravidla představuje antecedent, který je vyjádřen ve formě kombinace fuzzy výroků ( $x$  je NB), kde  $x$  je jazyková proměnná popisující některou stavovou veličinu procesu a NB je slovní hodnota této jazykové proměnné (term) reprezentována fuzzy množinou.

Část *then* tohoto pravidla, která se nazývá konsekvent, je reprezentována opět fuzzy množinou a představuje fuzzy výrokem (fuzzy systém typu Mamdani) nebo analytickým výrazem (fuzzy systémy typu Takagi-Sugeno a Tsukamoto) definovaný akční zásah do procesu [1] , [3].

Naplnit tuto bázi pravidel při návrhu fuzzy systému znamená tedy definovat následující parametry:

- jazykové proměnné
- množiny hodnot jazykových proměnných (NB - negativní velká, ... , PB - pozitivní velká)
- obsah antecedentů a konsekventů pravidel
- definovat všechna *if-then* pravidla

Vyhodnocení báze pravidel provádí inferenční mechanismus. Je to postup, který umožňuje stanovit výstupní fuzzy množinu pro danou vstupní fuzzy množinu, či vstupní ostrou hodnotu, při zvoleném způsobu interpretace implikace v pravidlech [3].

V modulu defuzzifikace se výstupní jazyková proměnná inferenčního mechanismu převádí na akční zásah. Výstupní hodnota se přiřazuje pomocí určitých metod, např. metodou těžiště, metodou váženého průměru aj. Metodu těžiště (zkr. COG) využívají fuzzy systémy typu Mamdani a metodu váženého průměru využívají fuzzy systémy typu Takagi-Sugeno a Tsukamoto. V další podkapitole budou podrobněji popsány dvě části fuzzy systému, tj. popis báze pravidel a báze dat.

## 2.3 Báze pravidel

V předchozí podkapitole bylo řečeno, že návrh parametrů báze pravidel zahrnuje definici následujících veličin:

### Volba proměnných a obsahu pravidel

V obecném případě může být použití fuzzy systému velmi rozmanité a tedy i volba veličin může být velmi rozmanitá. V dalším se budeme zabývat případem systémů typu Mamdani, Takagi-Sugeno a Tsukamoto.

Označme  $w$  žádanou hodnotu,  $y(k)$  skutečnou hodnotu řízeného procesu v čase  $k$ . Potom vstupní veličiny jsou definovány jako:

- odchylka označována  $e$ :

$$e(k) = w - y(k)$$

Odchylka se pohybuje v intervalu  $[-e_{\min}, e_{\max}]$ , přičemž tyto hodnoty dostaneme jako  $e_{\max} = w_{\max} - y_{\min}$  a  $e_{\min} = w_{\min} - y_{\max}$ .

Výstupní veličiny jsou

- akční zásah označovaný:

$$u(k)$$

### Volba množiny termů (slovních hodnot)

Jazyková proměnná, např. odchylka, je popsána množinou termů, tj. slovních hodnot, kterých jazyková proměnná nabývá. Ve fuzzy řízení je často užívanou množinou termů množina:

$$Le = \left\{ NB, NM, \underbrace{NS, ZO, PS}_{3MF}, PM, PB \right\}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{5MF}$   
 $\underbrace{\hspace{15em}}_{7MF}$

kde obecné symboly vyjadřují zkráceně velikost hodnoty, kterou jazyková proměnná nabývá. NB - negativní velká, NM - negativní střední, NS - negativní malá, ZO - nulová, PS - pozitivní malá, PM - pozitivní střední, PB - pozitivní velká [1]. V kódu jsou pro 3 MF vyčleněny symboly NS, ZO a PS atd.

## 2.4 Vyhodnocovací fuzzy systémy

V této sekci budou popsány tři typy vyhodnocovacích fuzzy systémů, které se používají v mnoha aplikacích. Rozdíly mezi těmito třemi typy vyhodnocovacích fuzzy systémů spočívají v konsekvenci jejich pravidel.

### Vyhodnocovací fuzzy systém typu Mamdani

Pro fuzzy systém typu Mamdani existuje celkem 5 metod pro defuzzifikaci fuzzy množiny. Nejznámější defuzzifikační metodou je metoda středu těžiště (Center of gravity - COG), kde defuzzifikovaná ostrá hodnota odpovídá souřadnici těžiště plochy tvořené sjednocením oříznutých výstupních fuzzy množin. Chceme-li aby navrhovaný fuzzy systém byl pokud možno robustní, volí se zpravidla tato metoda. Těžiště plochy se počítá formálně stejně jako statistická střední hodnota v souboru [3].

Báze pravidel Mamdaniho fuzzy systému je následující:

Pravidlo 1: *If* X0 je NB *and* (prod) X1 je NB0 *and* (prod) X2 je NB1 *then*  $u_1$ ;

.

Pravidlo 343: *If* X0 je PB *and* (prod) X1 je PB0 *and* (prod) X2 je PB1 *then*  $u_{343}$ ;

, kde např.  $u_1 = MF\_Y(1) + (MF\_Y(2) \cdot w_1 + MF\_Y(3)) + (MF\_Y(4) \cdot w_1 + MF\_Y(5)) + MF\_Y(6)$ ;

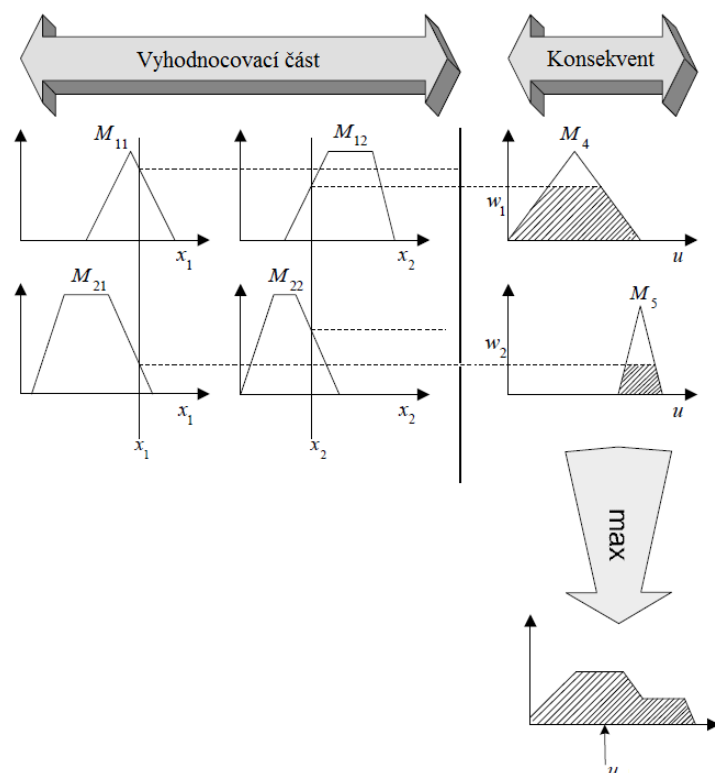
Vzorky **1**:  $MF\_Y(1)$ , **2**:  $MF\_Y(2) \cdot w_1 + MF\_Y(3)$ , **3**:  $MF\_Y(4) \cdot w_1 + MF\_Y(5)$ , **4**:  $MF\_Y(6)$ .

Označíme-li funkci příslušnosti, která vznikne sjednocením oříznutých výstupních fuzzy množin jako  $w = \mu(x_{vz})$ , pak defuzzifikovanou výstupní hodnotu metodou COG nalezneme podle vztahu [3]:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n c \cdot w_i}$$

, kde  $c$  je počet vzorků ( $c$  může nabývat hodnot 0 až 4) a  $u_i$  jsou vzorky.

Pozn.: pokud má vzorek  $x$  hodnotu nula, tak je počet vzorků  $c=c-1$



Obr. 2 Inference pro dvourozměrný případ, dvě pravidla a Mamdaniho implikaci

Výhody fuzzy systém typu Mamdani

- je intuitivní
- dá se přímo použít pro MISO a MIMO systémy

## Vyhodnocovací fuzzy systém typu Takagi-Sugeno

Pro mnohé účely, ať už jako regulátory, či jako modely dynamických systémů jsou velmi užitečné fuzzy systémy, které mají odlišný tvar pravidel než mají Mamdaniho fuzzy systémy. Pravidla používaná u sugenovských systému jsou opět ve tvaru fuzzy implikace a antecedent implikace je stejný jako u pravidel fuzzy systému typu Mamdani. Konsekvent této implikace se však liší, není to fuzzy výrok, ale analytický výraz. Funkce, která tvoří konsekvent pravidla je nejčastěji lineární funkce, většinou lineární kombinace složek antecedentu [3].

Báze pravidel Takagi-Sugeno fuzzy systému je následující:

Pravidlo 1: *If* X0 je NB *and* (*prod*) X1 je NB0 *and* (*prod*) X2 je NB1 *then*  $u_1$ ;

.

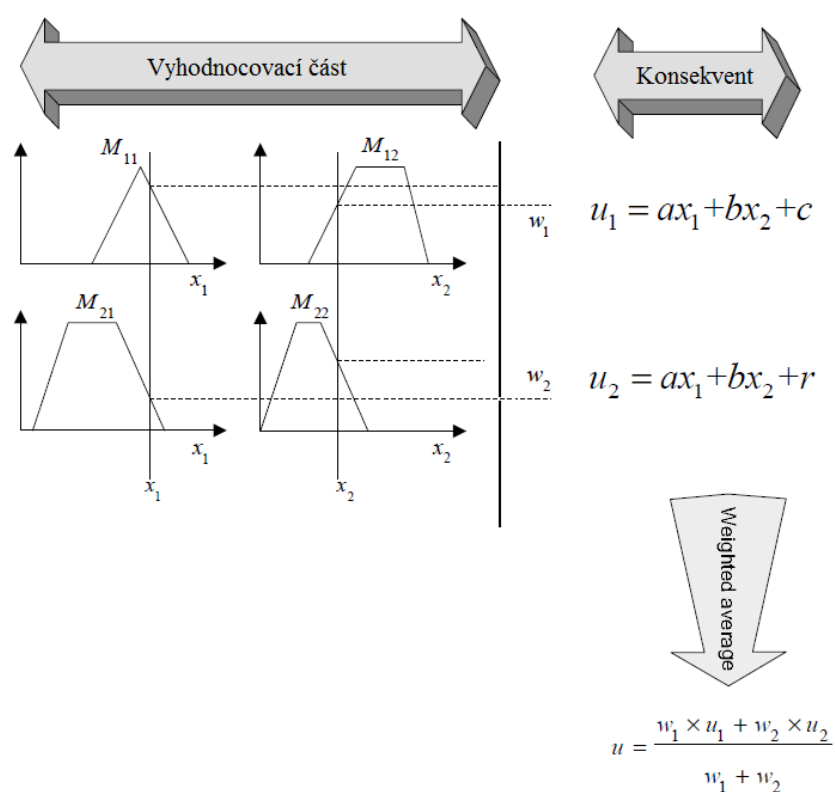
Pravidlo 343: *If* X0 je PB *and* (*prod*) X1 je PB0 *and* (*prod*) X2 je PB1 *then*  $u_{343}$ ;

, kde např.  $u_1 = MF\_Y(1) \cdot X_0 + MF\_Y(2) \cdot X_1 + MF\_Y(3) \cdot X_2 + MF\_Y(4)$ ;

Pro výstup platí:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Vzhledem k tomu, že výsledek  $u$  je dán průměrem  $u_1$  a  $u_2$ , tak se tato defuzzifikační metoda nazývá metodou váženého průměru. Metoda váženého průměru je metodou výpočetně jednoduchou a efektivní a proto bude dále využívána [3].



Obr.3 Takagi-Sugeno fuzzy mechanismus

Výhody fuzzy systém typu Takagi-Sugeno

- je výpočetně efektivní
- pracuje dobře s lineárními technikami (např. PID)
- pracuje dobře s optimalizačními a adaptivními technikami
- je zde zaručena kontinuita výstupního povrchu

## Vyhodnocovací fuzzy systém typu Tsukamoto

U fuzzy systému typu Tsukamoto je konsekvent každého pravidla reprezentován fuzzy množinou s monotónní funkcí příslušnosti (obr. 4). Výsledná hodnota se pak počítá jako vážený průměr a podobně jako pro fuzzy systém Takagi-Sugeno, platí [3]:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

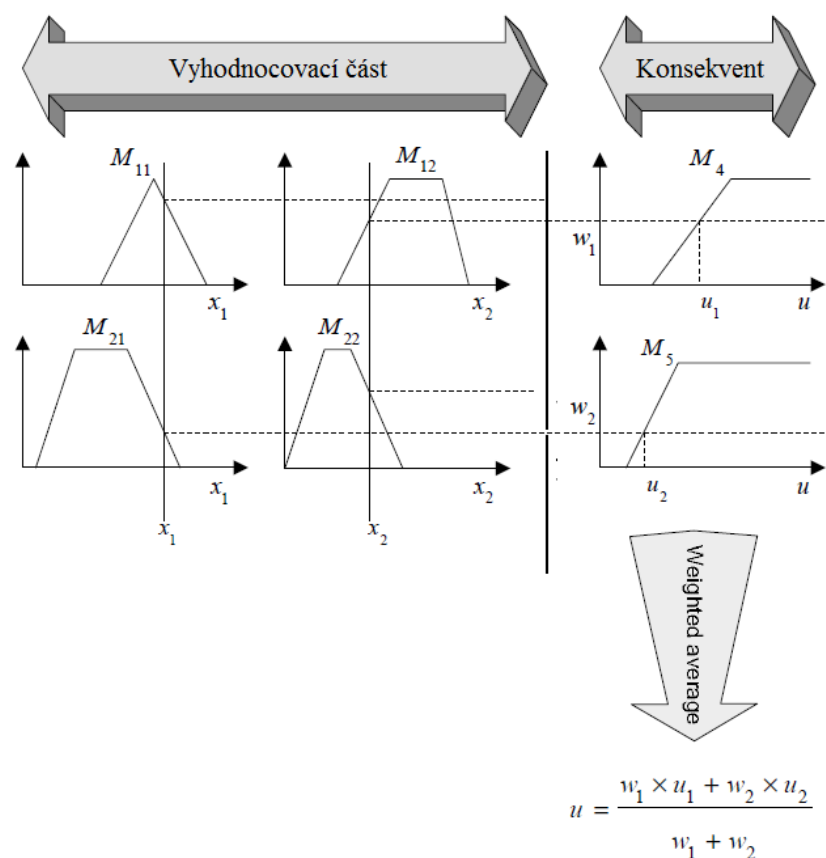
Báze pravidel Tsukamoto fuzzy systému je následující:

Pravidlo 1: *If* X0 je NB *and* (prod) X1 je NB0 *and* (prod) X2 je NB1 *then*  $u_1$ ;

.

Pravidlo 343: *If* X0 je PB *and* (prod) X1 je PB0 *and* (prod) X2 je PB1 *then*  $u_{343}$ ;

, kde např.  $u_1 = \text{MF\_Y}(1) \cdot w_1 + \text{MF\_Y}(2)$ ;



Obr.4 Tsukamoto fuzzy mechanismus

## 2.5 Báze dat

Báze dat poskytuje nezbytnou informaci pro správné fungování fuzzifikačního, defuzzifikačního bloku a báze pravidel. Báze dat obsahuje zejména [3]:

- funkce příslušností všech vstupních a výstupních fuzzy množin
- intervaly, v nichž se pohybují hodnoty vstupních a výstupních veličin

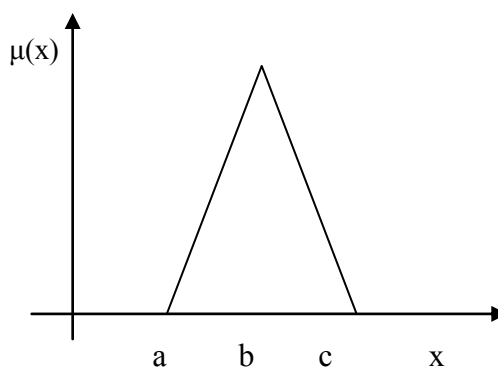
### Volba funkcí příslušnosti

Funkce příslušnosti je křivka, která určuje, jak je každý bod ve vstupním prostoru mapován na stupeň příslušnosti mezi 0 a 1. Z důvodu malé náročnosti na paměť i množství výpočtů je nejčastěji užívaným tvarem pro funkce příslušnosti tvar trojúhelníka ( $\Lambda$ -funkce) nebo lichoběžníka ( $\Pi$ -funkce). Což znamená pokud možno používat funkce příslušnosti složené z lineárních úseků. Tyto funkce lze popsat třemi nebo čtyřmi body a určení jejich funkční hodnoty v daném bodě (tj. fuzzifikace) je pouze otázka nalezení průsečíku s přímkou.

Předpis trojúhelníkové funkce příslušnosti:

Trojúhelníková funkce příslušnosti má následující předpis:

$$\Lambda(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & c < x \end{cases}$$



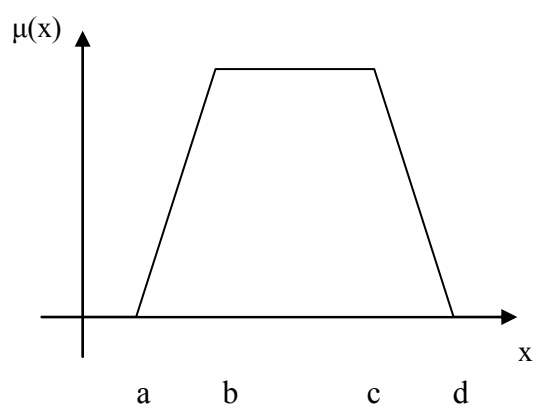
Obr. 5 Průběh trojúhelníkové funkce příslušnosti



Předpis lichoběžníkové funkce příslušnosti:

Lichoběžníková funkce příslušnosti má následující předpis:

$$\Pi(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases}$$



Obr. 6 Průběh lichoběžníkové funkce příslušnosti

Základem navrženého fuzzy systému je lichoběžníková funkce. Pokud se totiž sjednotí body b a c, tak vznikne  $\Lambda$ -funkce. Sjednocením bodů a a b vznikne L-funkce a sjednocením bodů c a d vznikne  $\Gamma$ -funkce.

### 3. Vytvoření modelu bloku fuzzy systému

#### 3.1 Struktura navržených fuzzy systémů

Fuzzy systém je navrhován v prostředí Matlab/Simulink. Simulink je grafický nástroj umožňující návrh funkčních bloků (funkcí) a jejich simulaci. Základním prvkem navrhovaného fuzzy systému je Embedded funkce, která obsahuje řídicí algoritmus s fuzzy logikou.

Pro návrh fuzzy systému jsou využity následující programové konstrukce:

a) Přepínač, který slouží k vícecestnému rozhodování testujícím. Pro fuzzy systém se používá u výběru množství funkcí příslušnosti. Jeho formální syntaxe je následující:

```
switch (výraz)
    case konstantní-výraz
        příkazy
    case konstantní-výraz
        příkazy
    otherwise
        příkazy
end
```

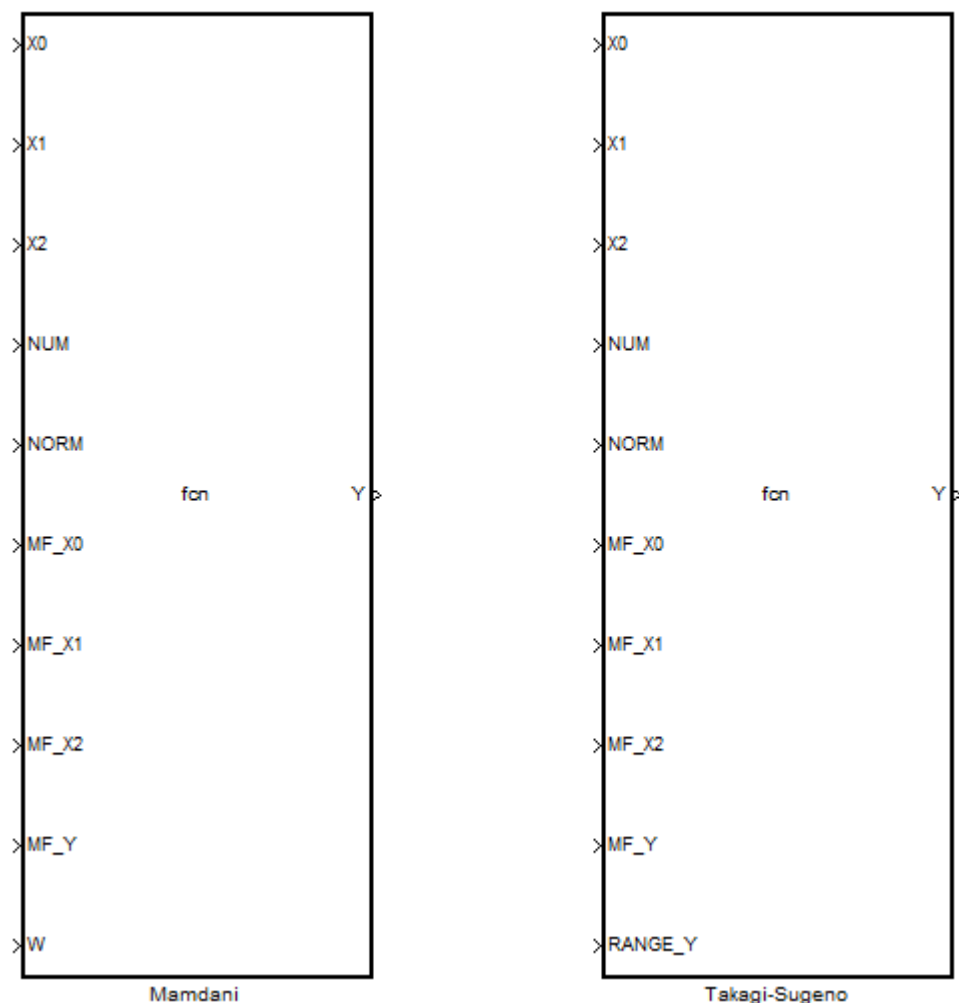
b) Příkaz jestliže-jinak, který se používá při rozhodování. Pro fuzzy systém se používá u definice lichoběžníkové funkce příslušnosti. Dále se používá pro nastavení rozsahu výstupu a pro výběr normy. Jeho formální syntaxe je následující:

```
if (výraz)
    příkazy;
elseif (výraz)
    příkazy;
else
    příkazy;
end
```

Navrženými fuzzy systémy jsou Mamdani a Takagi-Sugeno. Aby bylo možné využívat navržené fuzzy systémy jako PSD regulátor, tak byly navrženy funkční bloky Mamdani a Takagi-Sugeno se třemi vstupy. K tomu byly navrženy subsystémy Mamdani a Takagi-Sugeno s dvanácti vstupy a čtyřmi výstupy. Jejich bloky obsahují vstupy:

- X0, X1 a X2: vstupy pro chybu
- NUM: počet funkcí příslušnosti vstupů
- NORM: pokud se rovná 0, tak se počítá s minimální hodnotou váhových koeficientů (Mamdaniho implikace), pokud se rovná 1, tak se počítá se součinem hodnot váhových koeficientů (Larsenova implikace).
- MF\_X0: definice funkcí příslušnosti vstupu X0

- MF\_X1: definice funkcí příslušnosti vstupu X1
- MF\_X2: definice funkcí příslušnosti vstupu X2
- MF\_Y: definice funkcí příslušnosti výstupu Y
- W: vstup, který udává počet vzorků (platný pouze pro Mamdaniho fuzzy systém)
- RANGE\_Y: vstup, který udává rozsah výstupní proměnné Y (platný pouze pro Takagi-Sugeno fuzzy systém)



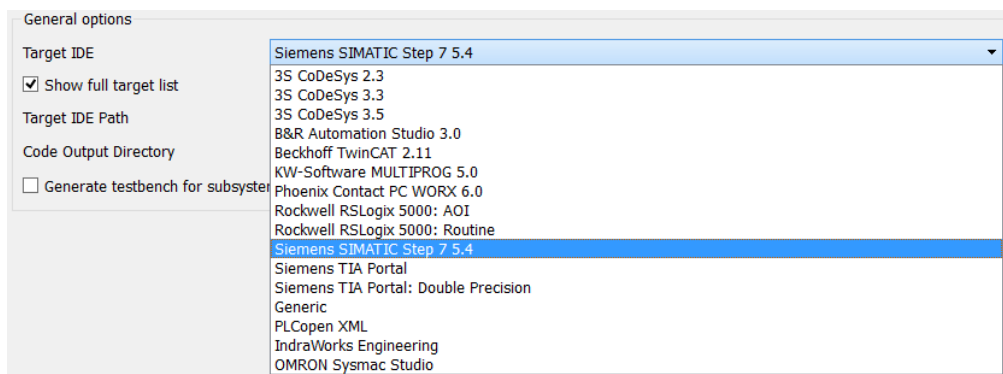
Obr.7 Funkční bloky navržených fuzzy systému typu Mamdani a Takagi-Sugeno

Vstupy NUM, NORM, MF\_X0, MF\_X1, MF\_X2, MF\_Y, W a RANGE\_Y představují bázi dat, kterou je nutné naplnit daty. Navrhované fuzzy systémy představují expertní systémy, které lze úpravou vstupních a výstupních signálů využívat také jako fuzzy PSD regulátory.

Další kapitola pojednává o problematice fuzzy PSD regulátorů, kde se podrobněji zabývá úpravou vstupních a výstupních signálů.

## 3.2 Simulink PLC Coder

Simulink PLC Coder slouží ke generování hardwarově nezávislého strukturovaného textu dle normy IEC 61131 ze Simulinkových modelů, Stateflow diagramů a algoritmů v jazyce Embedded MATLAB. Strukturovaný text je generován v PLCopen XML a dalších formátech, které jsou podporovány řadou integrovaných vývojových prostředí (IDE).



Obr. 8 Podporovaná vývojová prostředí (IDE)

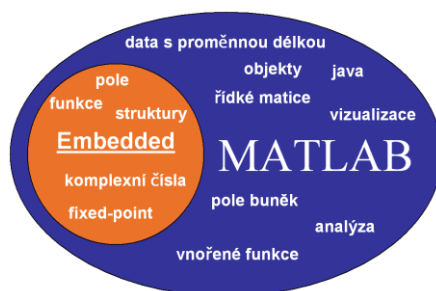
Ve výsledku je možné kompilovat a nasadit uživatelskou aplikaci na množství programovatelných automatů [4].

Oblasti využití:

- automatické řízení a regulace
- měření a testování

Dřív, než bude popsán proces generování ST kódu pomocí Simulink PLC Coderu je nutné objasnit si pojem Embedded MATLAB. Embedded MATLAB je podmnožina jazyka MATLABu, která umožňuje efektivní generování kódu (obr. 10). Embedded MATLAB se používá k návrhu algoritmů v MATLABu a jejich následnému překladu do jazyka vhodného k implementaci na cílové platformy.

Vše probíhá v rámci jednoho vývojového prostředí, což přináší výhody nejen pro snadnější tvorbu a testování algoritmů, ale i pohodlnější práci pro jejich vývojáře [5].

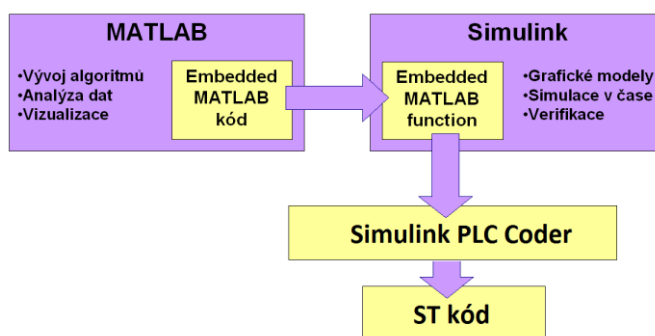


Obr. 9 Embedded MATLAB jako podmnožina funkcí MATLABu

## Proces generování

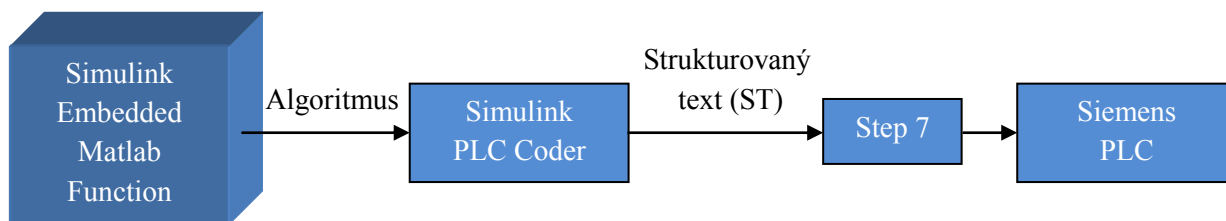
V prostředí SIMULINK (prostředí umožňující vytvářet modely z grafických prvků, jejich simulaci v čase a verifikaci údajů) je nutné vytvořit Embedded MATLAB funkci.

Embedded MATLAB funkce je tvořena Embedded MATLAB kódem. Embedded MATLAB kód je součástí prostředí MATLABu (prostředí umožňující vývoj algoritmů, analýzu dat a vizualizaci).



Obr. 10 Automatické generování kódu z Embedded MATLABu

Po vytvoření algoritmu se prostřednictvím Simulink PLC Coderu Embedded MATLAB kód přeloží do strukturovaného textu. Vygeneruje se tak soubor s příponou scl, který se po přidání do projektu ve vývojovém prostředí STEP7 zkompiluje. Po kompilaci je k dispozici funkční blok použitelný pro všechny typy PLC automatů od firmy SIEMENS.



Obr. 11 Proces převodu pomocí Simulink PLC kodéru

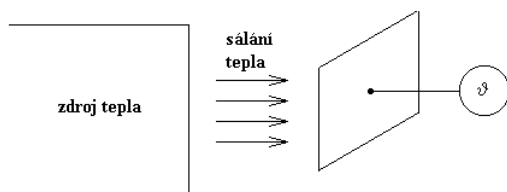
## 4. Testování fuzzy PSD regulátoru Takagi-Sugeno na tepelné soustavě v prostředí Matlab/Simulink

### 4.1 Vývojové prostředí Matlab/Simulink R2015b

Vývojové prostředí Matlab/Simulink R2015b je vývojové prostředí blokových schémat určené pro simulaci a návrh modelů. Prostředí podporuje simulaci, automatické generování kódu, nepřetržité testování a ověřování vestavěných systémů. Simulink poskytuje grafický editor, přizpůsobitelné knihovny a řešení pro modelování a simulaci dynamických systémů. Je integrován do Matlabu, což umožňuje začlenit algoritmy z Matlabu do modelů Simulinku a výsledky simulace exportovat zpět do Matlabu pro další analýzu.

### 4.2 Zjištění přenosu tepelné soustavy

Po domluvě s vedoucím diplomové práce a přihlédnutí k výhodám byl jako řešení diplomové práce zvolený fuzzy systém typu Takagi-Sugeno. Pro testování fuzzy PSD regulátoru typu Takagi-Sugeno byla zvolena úloha s tepelnou soustavou. Řešení této úlohy je založeno na fyzikálním modelu tepelné soustavy, jejíž vlastnosti mohou být velmi podobné s mnoha reálnými technologiemi v oblasti přenosu tepla, jeho měření a regulaci. Je zde zastoupen způsob přenosu tepelné energie *sáláním* ze zdroje tepla na část soustavy.

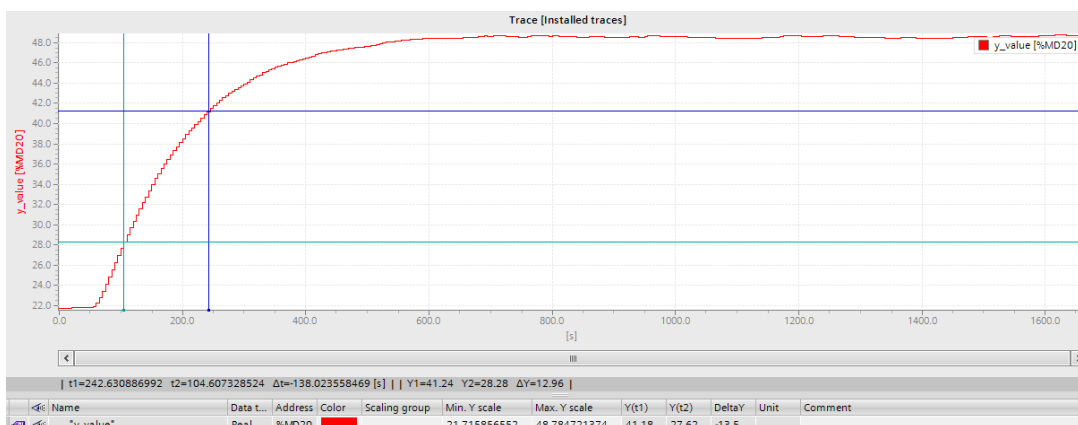


Obr. 12 Princip fyzikálního modelu



Obr. 13 Foto regulačního obvodu

Přenos tepelné soustavy lze zjistit dvěma způsoby. Základem je změřit hodnoty regulované veličiny v čase. Provádí se to přivedením jednotkového skoku (v případě tepelné soustavy nastavením výkonu žárovky na 100%) na vstup regulované soustavy a změření hodnot na výstupu regulované soustavy. Zde se využilo funkce Trace v prostředí TIA portal, pomocí které se změřil průběh regulované veličiny v čase [7]:



Obr. 14 Průběh regulované veličiny v čase

Postup výpočtu přenosu tepelné soustavy je následující:

a) Nejprve je nutné určit zesílení. Zesílení je dáno jako poměr rozdílu teplot a rozdílu napětí. Celkové zesílení vychází:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{48,8 - 21,8}{10 - 0} = 2,7$$

b) Pro hodnotu  $0,72y(\infty)$ :

$$\Delta v = v_{\text{stop}} - v_{\text{start}} = 48,8 - 21,8 = 27^{\circ}\text{C}$$

$$0,72 \cdot \Delta v = 0,72 \cdot 27 = 19,44^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{výsledek} = 21,8 + 19,44 = \underline{41,24^{\circ}\text{C}}$$

se odečte z přechodové charakteristiky časový okamžik  $t_1$  (Obr.14) a vypočte součet časových konstant  $T_1$  a  $T_2$  podle vztahu:

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1 - 50}{1,2564} = \frac{242,5 - 50}{1,2564} = \underline{153,2}$$

c) Dále se vypočte časový okamžik  $t_2$  podle vzorce:

$$t_2 = 0,3574 \cdot (T_1 + T_2) = 104,76\text{s} \text{ (k výsledku se musí připočítat hodnota 50s, protože se přechodová charakteristika neměřila od nuly)}$$

d) Z grafu přechodové charakteristiky se odečte hodnota  $y(t_2)$  (Obr. 14). V hodnotě  $y(104,76) = 28,28$  je po přepočtu na rozsah 0 až 1 hodnota 0,24.

e) Podle tabulky 1 se určí poměr časových konstant  $\tau_2$ , kde

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} = 0,128$$

$y(t_2)$	$\tau_2$	$y(t_2)$	$\tau_2$
0,3	0	0,22	0,183
0,29	0,023	0,21	0,219
0,28	0,043	0,2	0,264
0,27	0,063	0,19	0,322
0,26	0,084	0,18	0,403
0,25	0,105	0,17	0,538
0,24	0,128	0,16	1
0,23	0,154		

Tab. 1 Hodnoty regulované veličiny

f) Ze známého součtu a poměru časových konstant se vypočte  $T_1$  a  $T_2$ :

$$T_1 + T_2 = 153,2$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 0,128$$

$$T_1 = \underline{17,4} \text{ a } T_2 = \underline{135,8}$$

Po dosazení za symbolické proměnné vychází následující přenos (regulační člen):

$$G(s) = \frac{2,7}{(135,8 \cdot s + 1) \cdot (17,4 \cdot s + 1)}$$

Jedná se o statickou dvou-kapacitní regulovanou soustavu, která je charakteristická tím, že po skokové změně na vstupu se výstup ustálí na nové hodnotě. Z teorie automatického řízení je to proporcionální regulační člen se setrvačností 2.řádu (aperiodický člen 2.řádu).

U tepelné soustavy s žárovkou se uplatňují dvě kapacity a to: tepelná kapacita topného tělesa žárovky a tepelná kapacita místnosti. Dalším příkladem dvou-kapacitní regulované soustavy může být kromě tepelné soustavy s žárovkou ohřev vody v nádrži (tzv. bojler), tzn. daný přenos se vztahuje k tepelným soustavám. U ohřevu vody v nádrži se uplatňují také dvě kapacity a to: tepelná kapacita topného tělesa spirály a tepelná kapacita nádrže.



Trace umožňuje zobrazit trendy, pomocí kurzorů odečítat hodnoty a exportovat naměřené vzorky ve formátu csv. Takto exportovaná data lze použít v prostředí Matlab/System Identification Tool k identifikaci soustavy. Po nahrání dat a výběru typu přenosu soustavy Matlab vygeneroval následující data (obr.15).

**Transfer Function**

$$\frac{K}{(1 + Tp1 s)(1 + Tp2 s)}$$

**Poles**

2  All real

☐ Zero  
☐ Delay  
☐ Integrator

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	2.71	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	136.3623	Auto	[0 135439.4]
Tp2	<input type="checkbox"/>	17.6089	Auto	[0 20033.06]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

**Initial Guess**

☒ Auto-selected  
☐ From existing model:   
☐ User-defined

**Disturbance Model:** None   
**Focus:** Simulation   
**Initial condition:** Zero   
**Covariance:** Estimate   
☐ Display progress

**Name:** P2

Obr. 15 Zjištění přenosu tepelné soustavy

Prostřednictvím funkce ident (shoda=99,23) a manuálního výpočtu byl zjištěn přenos soustavy ve tvaru:

$$G(s) = \frac{2.7}{(136 \cdot s + 1) \cdot (17.5 \cdot s + 1)}$$

Navrženým fuzzy systémem je diskrétní systém, proto je nutné zařadit do obvodu tvarovací obvod, popř. převést spojitou soustavu na diskrétní.

Pro přenos  $G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$  se volí vzorkovací perioda  $T \approx 0.1 \cdot T_{\max}$ .

V případě zadané soustavy o přenosu  $G(s) = \frac{2.7}{(136 \cdot s + 1) \cdot (17.5 \cdot s + 1)}$  je vzorkovací perioda  $T \approx 0.1 \cdot 136 = 13.6s$ .

Převod spojité soustavy na diskretní soustavu se provádí pomocí funkce c2dm (z angl. continuous to discrete model):

```
s=tf('s');
Gs=2.7/((136*s+1)*(17.5*s+1));
Ts=5;
[Pz,Qz]=c2dm(Gs.num,Gs.den,Ts,'zoh');
G=tf(Pz,Qz,Ts,'Variable','z^-1')
```

G =  

$$\frac{0.01276 z^{-1} + 0.01146 z^{-2}}{1 - 1.715 z^{-1} + 0.7244 z^{-2}}$$

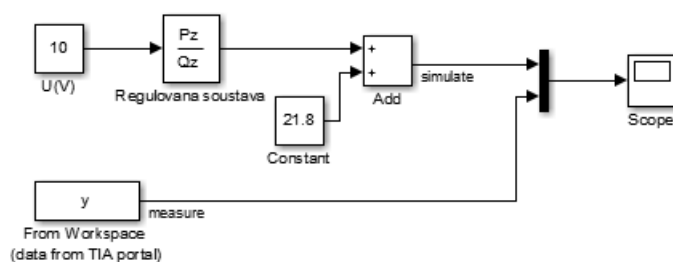
-----  

$$1 - 1.715 z^{-1} + 0.7244 z^{-2}$$

Sample time: 5 seconds

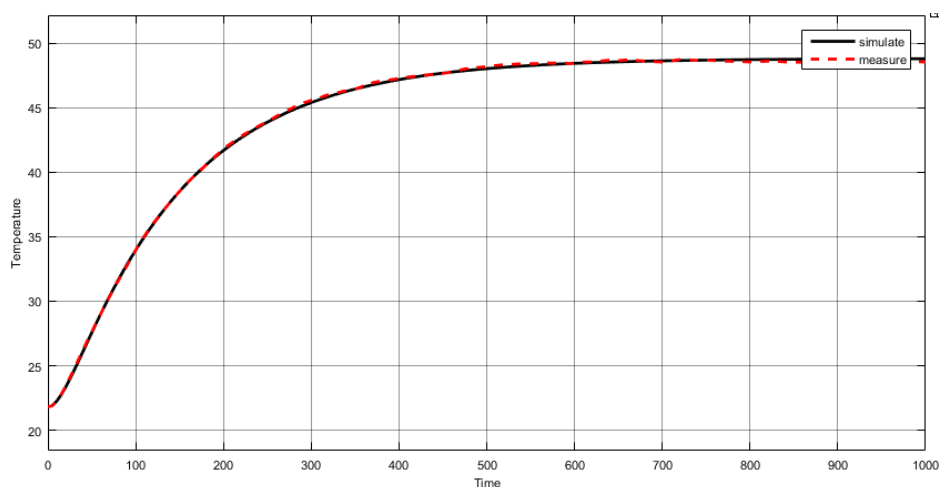
Discrete-time transfer function.

Porovnání měřeného a simulovaného signálu tepelné soustavy se provádí v Simulinku, kdy se na vstup regulované soustavy přivede napětí 10V a na výstupu regulované soustavy je nutné přičíst hodnotu 21,8°C, která simuluje počáteční podmínky. Schéma je následující:



Obr. 16 Schéma pro porovnání signálů

Z obr. 17 je patrné, že dochází téměř k dokonalému překrytí měřeného a simulovaného signálu.



Obr. 17 Průběhy měřeného a simulovaného signálu

### 4.3 Fuzzy PSD regulátor typu Takagi-Sugeno

Fuzzy PSD regulátory mají normalizovanou bázi dat. Důležitým faktorem při návrhu fuzzy PSD regulátoru je zjištění váhových konstant, pomocí kterých se upravují signály  $e$ ,  $\Delta e$  a  $\Delta^2 e$  vstupující do fuzzy PSD regulátoru. Dále se pomocí váhové konstanty upravuje signál  $\Delta u$  vystupující z fuzzy PSD regulátoru. Signál  $e$  představuje regulační odchylku, signál  $\Delta e$  představuje první diferenci regulační odchylky a signál  $\Delta^2 e$  představuje druhou diferenci regulační odchylky. Výstupní signál  $\Delta u$  pak představuje první diferenci akčního zásahu, kterou je nutné integrovat. Pro signály platí:

$$\begin{aligned} e(k \cdot T) &= w - y(k \cdot T) \\ \Delta e(k \cdot T) &= e(k \cdot T) - e[(k-1) \cdot T] \\ \Delta^2 e(k \cdot T) &= \Delta e(k \cdot T) - \Delta e[(k-1) \cdot T]; \Delta e[(k-1) \cdot T] = e[(k-1) \cdot T] - e[(k-2) \cdot T] \\ u(k \cdot T) &= u[(k-1) \cdot T] + \Delta u(k \cdot T) \end{aligned}$$

, kde  $k$  je krok a  $T$  perioda vzorkování.

Báze pravidel fuzzy PSD regulátoru pro 5 funkcí příslušnosti je následující:

Pravidlo 1: *If  $e$  je NM and  $\Delta e$  je NM0 and  $\Delta^2 e$  je NM1 then  $\Delta u$  je NM;*

.

Pravidlo 125: *If  $e$  je PM and  $\Delta e$  je PM0 and  $\Delta^2 e$  je PM1 then  $\Delta u$  je PM;*

Fuzzy PSD regulátor je složitý systém, proto se používá pro zjednodušení tabulka obsahující pro všechny kombinace antecedentu dané hodnoty konsekventu. Jedná se o mapování vstupů na výstup (tab. 2).

de/dde	NM	NS	ZO	PS	PM	
NM	NM	NM	NM	NM	NS	e=NM
NS	NM	NM	NM	NS	NS	
ZO	NM	NM	NS	NS	ZO	
PS	NM	NS	NS	ZO	PS	
PM	NS	NS	ZO	PS	PS	
NM	NM	NM	NM	NS	NS	e=NS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	
NM	NM	NM	NS	NS	ZO	e=ZO
NS	NM	NS	NS	ZO	PS	
ZO	NS	NS	ZO	PS	PS	
PS	NS	ZO	PS	PS	PM	
PM	ZO	PS	PS	PM	PM	
NM	NM	NS	NS	ZO	PS	e=PS
NS	NS	NS	ZO	PS	PS	
ZO	NS	ZO	PS	PS	PM	
PS	ZO	PS	PS	PM	PM	
PM	PS	PS	PM	PM	PM	
NM	NS	NS	ZO	PS	PS	e=PM
NS	NS	ZO	PS	PS	PM	
ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	
PS	PS	PS	PM	PM	PM	
PM	PS	PM	PM	PM	PM	

Tab. 2 Mapování vstupů na výstup

Nyní se přistoupí k naplnění báze dat navrženého fuzzy PSD regulátoru typu Takagi-Sugeno.

Nejdřív se musí nadefinovat množství funkcí příslušnosti, zde bylo zvoleno 5. Dále se nadefinují vstupní funkce příslušnosti pro tři vstupy  $X_0$ ,  $X_1$  a  $X_2$ . Základem je trojúhelníková funkce.

Nastavení je následující:

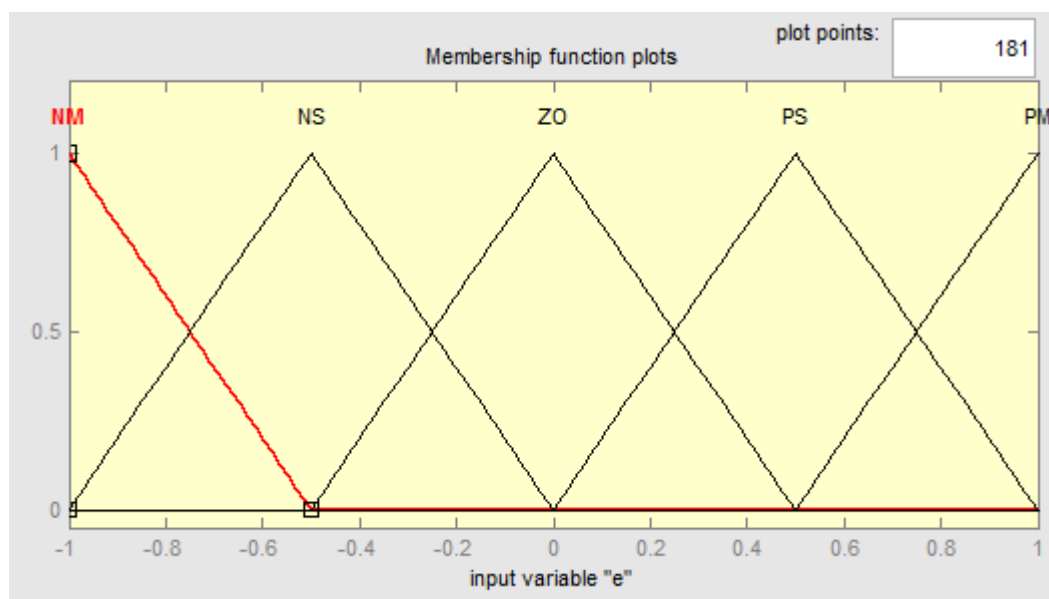
NM je trojúhelníková funkce s parametry:  $a=-1$ ,  $b=-1$ ,  $c=-1$  a  $d=-0.5$ .

NS je trojúhelníková funkce s parametry:  $a=-1$ ,  $b=-0.5$ ,  $c=-0.5$  a  $d=0$ .

ZO je trojúhelníková funkce s parametry:  $a=-0.5$ ,  $b=0$ ,  $c=0$  a  $d=0.5$ .

PS je trojúhelníková funkce s parametry:  $a=0$ ,  $b=0.5$ ,  $c=0.5$  a  $d=1$ .

PM je trojúhelníková funkce s parametry:  $a=0.5$ ,  $b=1$ ,  $c=1$  a  $d=1$ .



Obr. 18 Funkce příslušnosti vstupu  $e$  (platí také pro vstupy  $\Delta e$  a  $\Delta 2e$ )

Dále je nutné nadefinovat funkce příslušnosti výstupu  $Y$ . Hlavním požadavkem bylo, aby nastavení odpovídalo tabulce 2. Tomu odpovídá následující nastavení výstupních funkcí příslušnosti:

Nastavení Takagi-Sugeno:

$NM = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 - 1$ ;

$NS = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 - 0.5$ ;

$ZO = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + 0$ ;

$PS = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + 0.5$ ;

$PM = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + 1$ ;

Nastavení Mamdani:

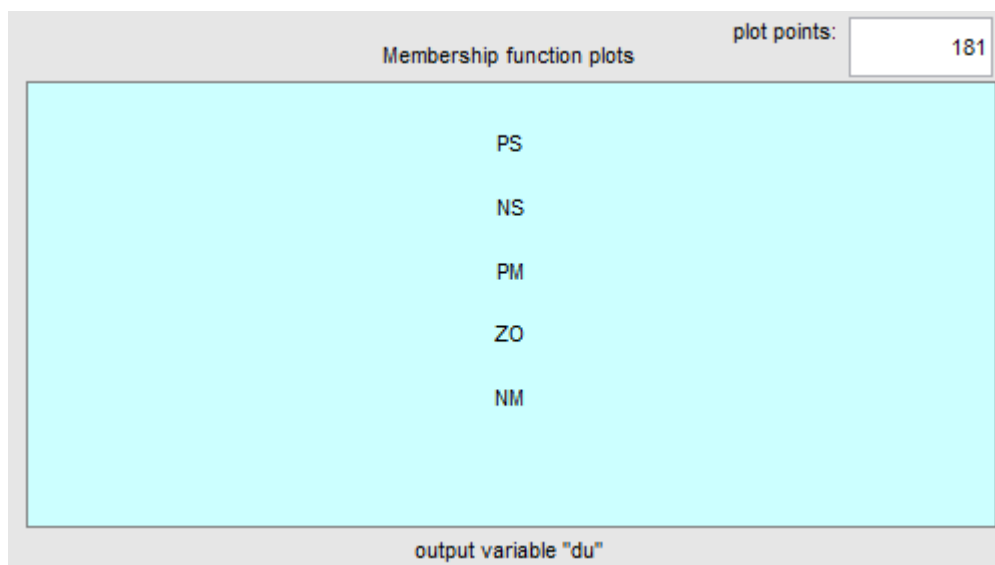
$NM = -1 - 0.5 \cdot w - 0.5 + 0 \cdot w + 0 - 0.725$ ;

$NS = 0 + 0.5 \cdot w - 1 - 0.5 \cdot w + 0 + 0$ ;

$ZO = -0.25 + 0.5 \cdot w - 0.5 - 0.5 \cdot w + 0.5 + 0.25$ ;

$PS = 0 + 0.5 \cdot w + 0 - 0.5 \cdot w + 1 + 0$ ;

$PM = 0.725 + 0.5 \cdot w + 0.5 + 0 \cdot w + 0 + 1$ ;



Obr. 19 Funkce příslušnosti výstupu

Nastavením rozsahu Y se nastaví maximální rozsah regulované veličiny, v našem případě je roven: [-1 1]. Dříve než bude uveden návrh regulačního obvodu, tak zde budou popsány metody zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru.

#### 4.4 Zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru

U fuzzy PSD regulátoru je možné nastavit váhové konstanty dvěma způsoby. První způsob využívá znalostí PID konstant konvenčního PID regulátoru. Nejdříve se pomocí funkce `pdtune` (z angl. pid tuning) zjistí konstanty pro danou soustavu. Algoritmus funkce `pdtune` je následující:

```
s=tf('s');
Gs=2.7/((136*s+1)*(17.5*s+1));
opts = pdtuneOptions('PhaseMargin',60);
Gr=pdtune(Gs,'PID',opts)
```

Gr =

$$K_p + K_i * \frac{1}{s} + K_d * s$$

with  $K_p = 0.643$ ,  $K_i = 0.00737$ ,  $K_d = 11.9$

Continuous-time PID controller in parallel form.

Konstanty vyžadované pro výpočet se musí nejdříve přepsat do tvaru s časovými konstantami:

$$G_R(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 0.643 \cdot \left( 1 + \frac{1}{87.26 \cdot s} + 18.5s \right)$$

Dále je nutné odvodit rychlostní algoritmus fuzzy PSD regulátoru:

$$\begin{aligned} \Delta u(n) &= K_p \cdot \left[ \Delta e(n) + \frac{T_{vz}}{T_i} \cdot e(n) + \frac{T_d}{T_{vz}} \cdot \Delta^2 e(n) \right] = \\ &= K_p \cdot \frac{T_{vz}}{T_i} \cdot e(n) + K_p \cdot \Delta e(n) + K_p \cdot \frac{T_d}{T_{vz}} \cdot \Delta^2 e(n) \end{aligned}$$

Nakonec se použije vzorec pro přepočet konstant v následující formě:

$$\begin{aligned} K_e^{PSD} &= K_p \cdot \frac{T_{vz}}{M \cdot T_i} = 0.643 \cdot \frac{14}{10 \cdot 87.26} = \underline{\underline{0.01}} \\ K_{\Delta e}^{PSD} &= \frac{K_p}{M} = \frac{0.643}{10} = \underline{\underline{0.064}} \\ K_{\Delta^2 e}^{PSD} &= K_p \cdot \frac{T_d}{M \cdot T_{vz}} = 0.643 \cdot \frac{18.5}{10 \cdot 14} = \underline{\underline{0.085}} \\ K_{\Delta u}^{PSD} &= \underline{\underline{10}} \end{aligned}$$

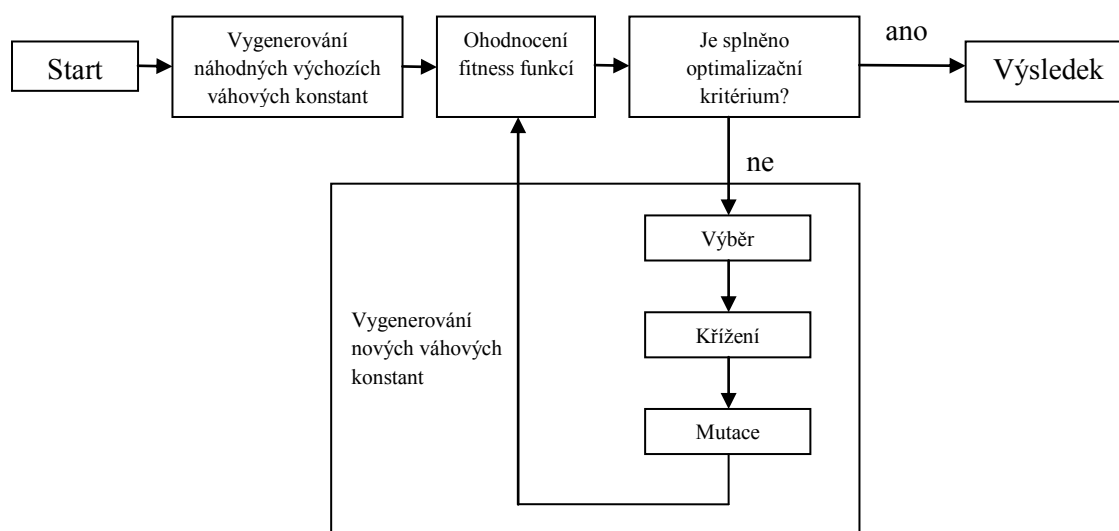
, kde M je měřítko a  $T_{vz}$  je vzorkovací perioda. Zesílení výstupu je zde volitelné (volí se např. 0.1, 1 nebo 10 a to podle toho, jaká má být odezva systému na jednotkový skok, tzn. pro hodnotu 1 bude odezva pomalá, ale systém bude stabilní, pro hodnotu 10 bude odezva rychlejší, ale systém bude méně stabilní).

Druhý způsob je nastavení váhových konstant pomocí genetického algoritmu (GA).

Genetické algoritmy se používají ke generování řešení z oblasti optimalizace. Genetické algoritmy patří do širší třídy evolučních algoritmů, které generují řešení optimalizačních problémů pomocí technik inspirovaných přírodní evolucí jako je dědičnost, mutace, výběr a přechod. Cílem optimalizace váhových konstant je získat rychlou odezvu a kratší dobu regulace.

Důležitým pojmem je fitness funkce, která udává kvalitu řešení (optimální hodnota fitness funkce je rovna 0). Fitness funkce obsahuje omezující podmínky (doba regulace, překmit) podle nichž je hledáno optimální řešení.

Nastavení genetického algoritmu se provádí podle následujícího diagramu [6]:



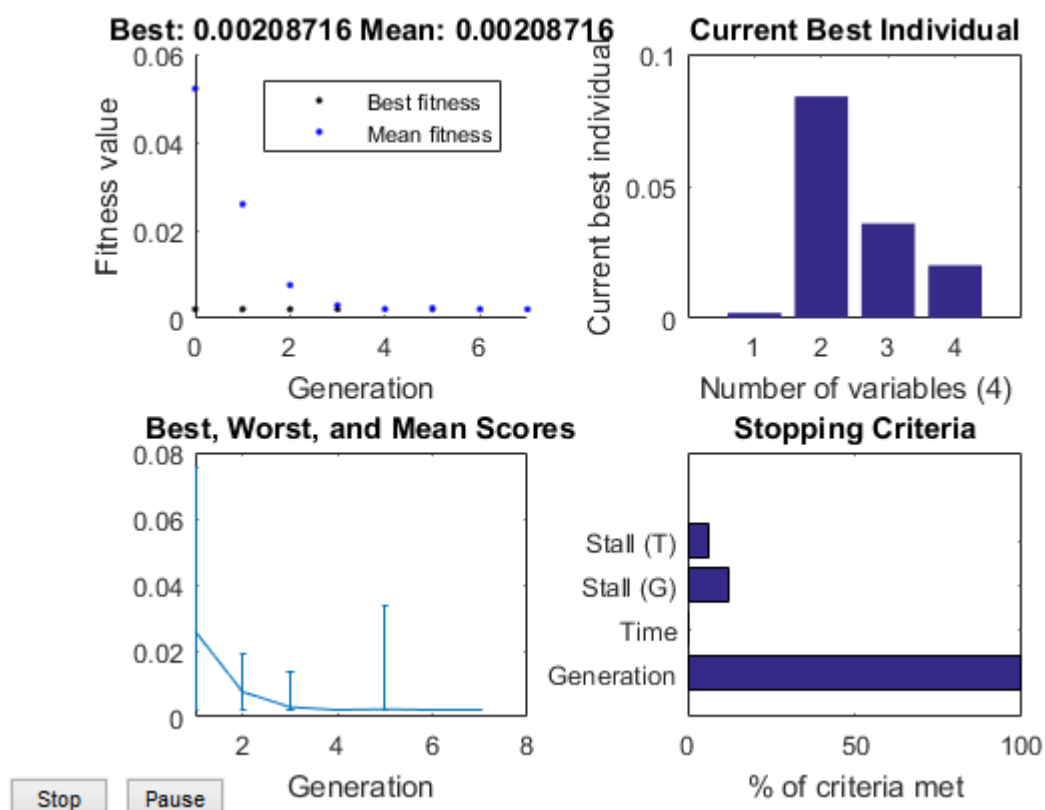
Obr. 20 Diagram vykonávání genetického algoritmu

Pro spuštění genetického algoritmu je nutné mít vytvořený skript pro optimální výpočet váhových konstant a skript pro výpočet fitness funkce váhových konstant. Dále je nutné nadefinovat v prvním skriptu počáteční nastavení výpočtu parametru, tzn. velikost populace = 70, dolní mez = 0, horní mez = 0.1, počet generací = 7 a maximální čas GA = 2500. U parametrů velikosti populace a počtu generací platí, že čím je jejich hodnota vyšší, tím je větší pravděpodobnost nalezení optimálního výsledku [8].

V druhém skriptu je nutné nastavit dobu regulace = 100 s. Pokud mám nastaveny všechny potřebné parametry, tak nezbývá než navrhnout schéma zapojení (regulační obvod). Ve schéma je nutné na místo číselných hodnot váhových konstant psát jejich symbolický název (to samé platí pro regulační odchylku a regulovanou veličinu). Když je vše připraveno, tak nezbývá než spustit vykonávání genetického algoritmu. Po vykonání GA se na místo symbolických názvů váhových konstant vypíší číselné hodnoty váhových konstant, tzn. výsledek řešení GA.



Průběhy výpočtu genetického algoritmu jsou následující:



Obr. 21 Průběhy výpočtu genetického algoritmu

První průběh udává hodnotu fitness funkce (hodnota fitness funkce se rovná první váhové konstantě), druhý průběh udává hodnoty jednotlivých proměnných.

Další průběhy udávají statistické údaje. Pro nastavené parametry genetický algoritmus vygeneroval následující hodnoty váhových koeficientů (pozn.: parametr  $K_{du}$  byl upraven):

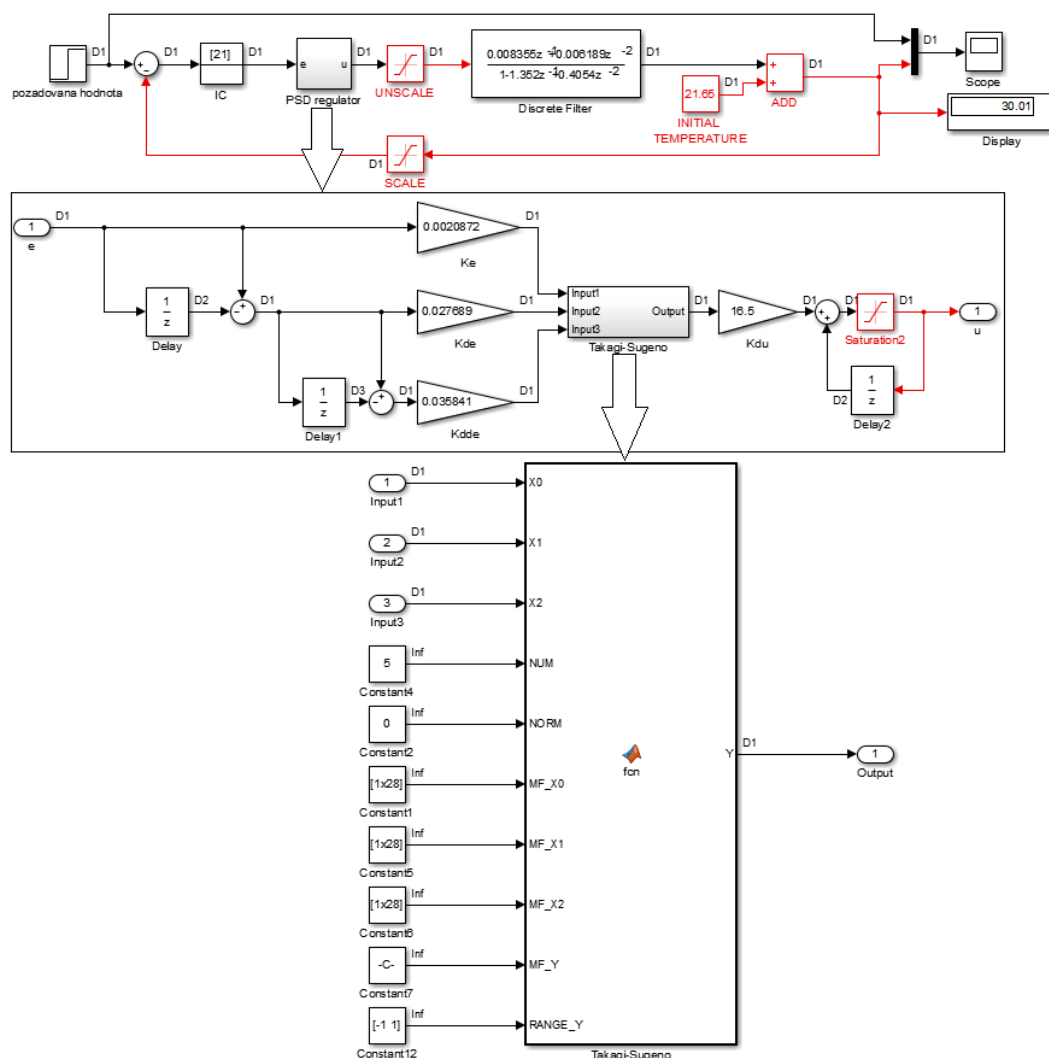
$$K_e^{PSD} = \underline{\underline{0.0020872}}$$

$$K_{\Delta e}^{PSD} = \underline{\underline{0.027689}}$$

$$K_{\Delta^2 e}^{PSD} = \underline{\underline{0.035841}}$$

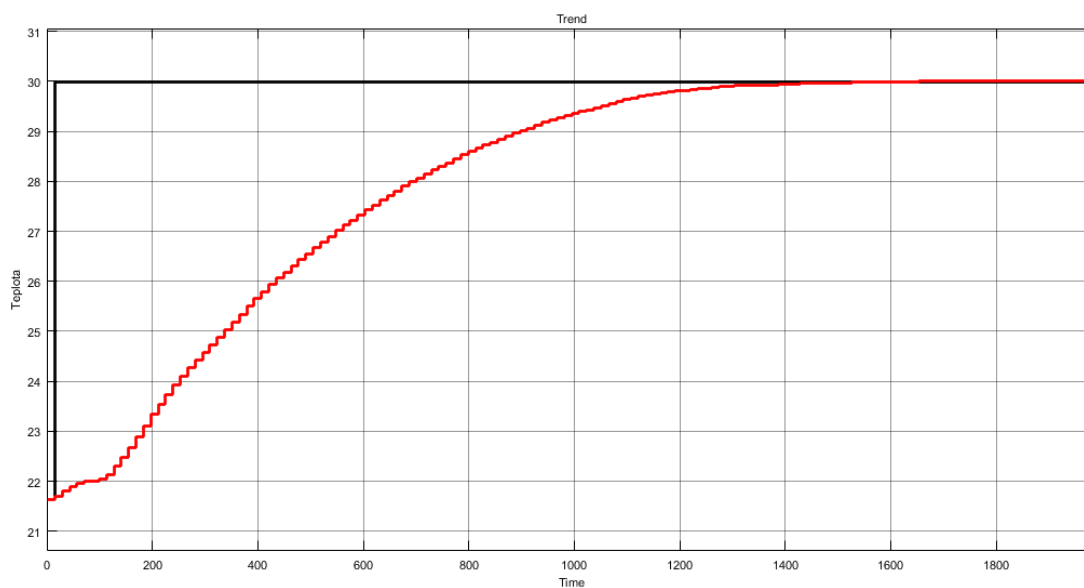
$$K_{\Delta u}^{PSD} = \underline{\underline{16.5}}$$

Po naplnění báze dat se přistoupí k návrhu schéma. Schéma regulačního obvodu a vnitřní struktura fuzzy PSD regulátoru je znázorněna na obr. 22. Na schéma lze vidět označení D1 s periodou vzorkování 14s, D2 s periodou vzorkování 28s a D3 s periodou vzorkování 42s.



Obr.22 Schéma regulačního obvodu tepelné soustavy

Nakonec se musí nastavit simulace pomocí fixního kroku s krokem 14 (vzorkovací perioda) a spustí se simulace. Červený průběh platí pro váhové koeficienty vypočtené pomocí genetického algoritmu (obr. 23).



Obr. 23 Průběh teploty tepelné soustavy

#### Výhody řešení pomocí genetického algoritmu

- je robustní
- je aplikovatelný na různé úlohy (např. pro dynamickou optimalizaci)
- poskytuje větší množství optimálních řešení

#### Nevýhody řešení pomocí genetického algoritmu

- doba vykonávání
- problém s nalezením optimálního řešení
- je nutné správně určit počáteční nastavení výpočtu parametrů

## **5. Testování fuzzy PSD regulátoru Takagi-Sugeno na tepelné soustavě v prostředí TIA portal**

### **5.1 Vývojové prostředí TIA portal V13 SP1**

TIA portal V13 SP1 je inženýrský SW pro konfiguraci PLC SIMATIC S7-1200/1500, 300, 400 a obsahuje prostředí pro tvorbu vizualizace. TIA portal V13 SP1 umožňuje konfiguraci a parametrizaci HW, nastavení komunikace (PROFIBUS, PROFINET...), vytváření programů v jazycích LAD, FBD a STL, testování a uvedení do provozu, dokumentaci, archivaci a programování HMI panelů a dále obsahuje provozní a diagnostické funkce.

### **5.2 HW konfigurace**

Součástí HW konfigurace je PLC S7-1500, ke kterému jsou připojeny digitální a analogové vstupy/výstupy.

#### **Programovatelný automat S7-1500 (slot 1)**

Zvolený typ procesoru programovatelného automatu je CPU 1516-3 PN/DP, které slouží pro velké a komunikační aplikace. K dispozici jsou: rozhraní 1x PROFINET IRT 100Mb (2x port RJ45 přepínač), 1x ETHERNET (1x port RJ45), 1x PROFIBUS Master, displej, 1MB integrované pracovní paměti pro program, 5MB integrované pracovní paměti pro data a CPU dokáže zpracovat bitové operace během 10ns.

#### **Digitální vstupy (slot 2)**

Zvolený typ digitálních vstupů je DI 32x24V DC HF, modul obsahuje 32 vstupů, diagnostické a procesní přerušení. Vstupní zpoždění se pohybuje v rozsahu od 0,05 do 20ms.

#### **Digitální výstupy (slot 3)**

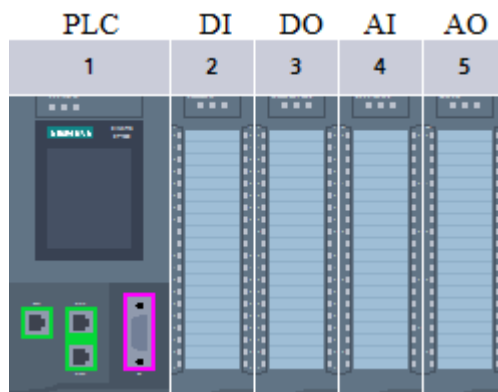
Zvolený typ digitálních výstupů je DO 32x24VDC/0.5A ST, modul obsahuje 32 výstupů, diagnostické přerušení a pracuje v isochronním módu.

#### **Analogové vstupy (slot 4)**

Zvolený typ analogových vstupů je AI 8xU/I/RTD/TC ST, modul obsahuje 8 vstupů, diagnostické a procesní přerušení. Rozlišení A/D převodníku je 16 bitů včetně znaménka.

### Analogové výstupy (slot 5)

Zvolený typ analogových výstupů je AO 4xU/I ST, modul obsahuje 4 výstupy a diagnostické přerušení. Rozlišení D/A převodníku je 16 bitů včetně znaménka.



Obr. 24 HW konfigurace

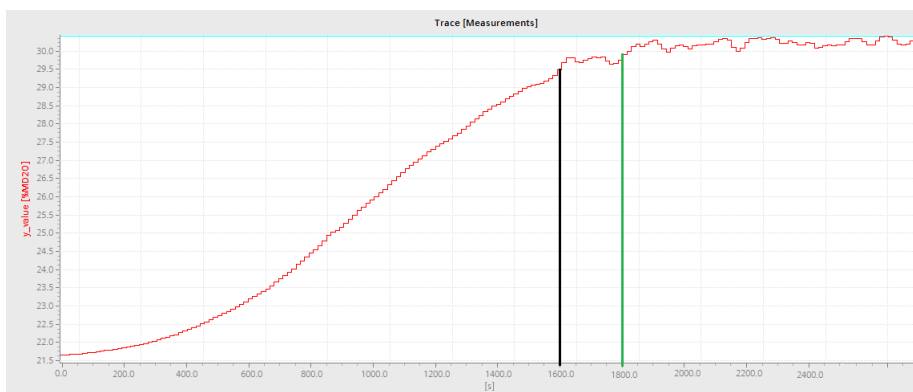
### 5.3 Program

Program pro regulaci teploty tepelné soustavy je nutné umístit do bloku cyklického přerušení, který umožňuje spustit programy v pravidelných intervalech a to nezávisle na cyklickém provádění programu (intervaly se definují ve vlastnostech OB). Bloky cyklického přerušení se označují OB30 až 38. Program se dělí na 3 organizační bloky (OB30, OB31 a OB32). V OB30 se vykonává hlavní program s periodou vzorkování  $T=14s$ . OB31 se vykonává s periodou 28s a generuje odchylku  $e(k-1)*T$  a  $y(k-1)*T$  a OB32 se vykonává s periodou 42s a generuje odchylku  $e(k-2)*T$ . Hlavní program obsahuje 7 sítí s následujícími funkcemi:

- a) SCALE: funkce sloužící pro převod celého čísla v parametru IN na číslo s plovoucí desetinnou čárkou. Pomocí parametru LO\_LIM a HI\_LIM se určí dolní a horní mez rozsahu vstupních hodnot. Výsledkem funkce SCALE je výstup v parametru OUT.
- b) SUB: funkce sloužící pro výpočet regulační odchylky. MUL: funkce sloužící pro násobení regulační odchylky váhovou konstantou.
- c) SUB: funkce sloužící pro výpočet první difference regulační odchylky. MUL: funkce sloužící pro násobení první difference regulační odchylky váhovou konstantou.
- d) SUB: funkce sloužící pro výpočet druhé difference regulační odchylky. MUL: funkce sloužící pro násobení druhé difference regulační odchylky váhovou konstantou.
- e) FuzzyBlock: funkční blok sloužící pro regulaci teploty tepelné soustavy.
- f) MUL: funkce sloužící pro násobení akčního zásahu váhovou konstantou. ADD: funkce sloužící pro integraci první difference akčního zásahu.

g) UNSCALE: funkce sloužící pro převod čísla s plovoucí desetinnou čárkou v parametru IN na celé číslo. Pomocí parametru LO\_LIM a HI\_LIM se určí dolní a horní mez rozsahu vstupních hodnot. Výsledkem funkce UNSCALE je výstup v parametru OUT. Horní a dolní mez se většinou nastaví LO\_LIM = 0 a HI\_LIM=100. Během generování funkčního bloku

fuzzy systému se vytvořil datový blok, který obsahuje bázi dat, která se musí naplnit daty (struktura dat je uvedena v kapitole 4.3). V TIA portalu jsou pro regulaci teploty použité váhové koeficienty vypočtené pomocí vzorců. Po úspěšné kompilaci a nahrání programu do PLC vychází pro počáteční teplotu rovnu 21.65°C a žádanou hodnotu rovnu 30°C v TIA portalu následující charakteristika:

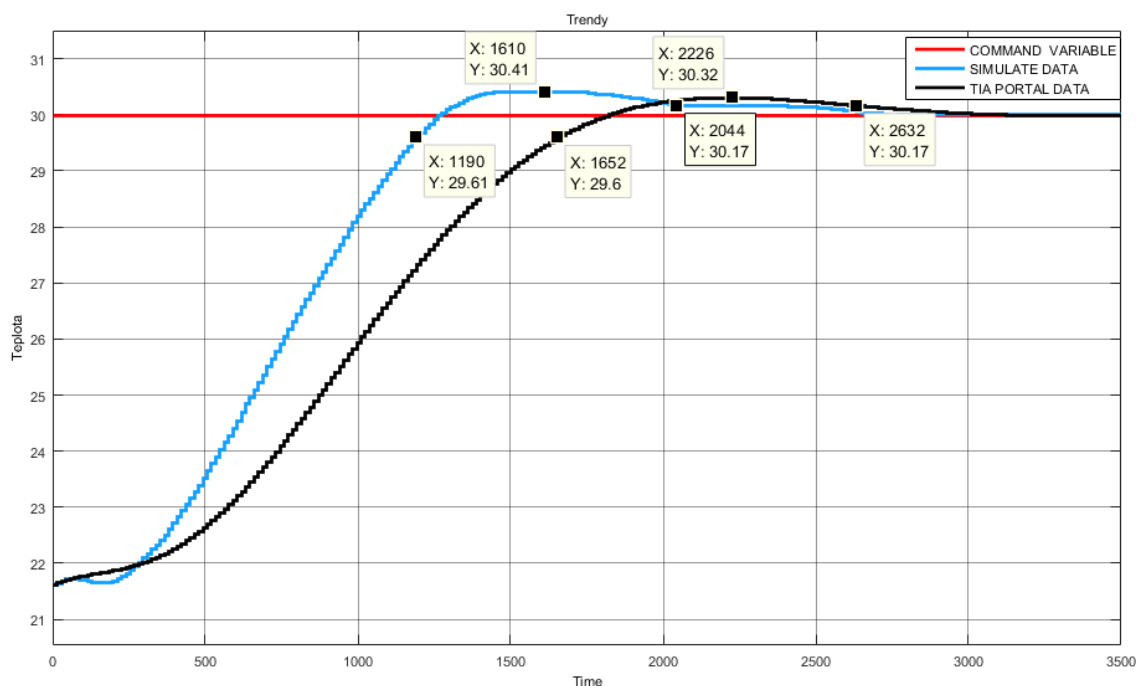


Obr. 25 Přechodová charakteristika tepelné soustavy

Z obr. 25 je patrné, že průběh má charakter přechodové charakteristiky 2.řádu. Potvrdila se tak správnost určení přenosu identifikované soustavy z kapitoly 4. Od času 1600 s (černá čára), kdy se aktuální hodnota blížila hodnotě žádané docházelo k výchyilkám, které poukazují na citlivost tepelné soustavy a měnícím se okolním podmínkám. Teplota se od času 1800 s (zelená čára) pohybovala v rozsahu 30 až 30.4°C.

## 5.4 Porovnání průběhů regulované veličiny

Mezi hlavní parametry patří: překmit, který reprezentuje hodnotu, kdy regulovaná veličina dosáhne svého maxima, doba ustálení, která představuje čas, kdy se hodnota regulované veličiny nachází v pásmu  $\pm 2\%$  v okolí žádané hodnoty a doba odezvy, což je čas, kdy regulovaná veličina dosáhne 95 % žádané hodnoty. Kvalitu regulace určuje kritérium kvadratické regulační plochy ITAE. Z předmětu regulační systémy pro kritérium ITAE platí: čím menší hodnota integrálu regulační plochy J, tím je kvalitnější regulace, z čehož vyplývá, že návrh regulátoru metodou PIDTune nám dává v porovnání s návrhem pomocí metody ITAE a frekvenční metody kvalitou nejhorší regulaci. Ovšem funkce PIDTune generuje ze všech tří metod nejmenší překmit, proto zde byla uvedena jako řešení pro výpočet váhových konstant fuzzy PSD regulátoru. Porovnání průběhů vychází následovně (obr. 26). Průběh dat z TIA portalu byl interpolován polynomem 10.řádu.



Obr. 26 Porovnání přechodových charakteristik tepelné soustavy

Z výstupních charakteristik vyplývají následující parametry:

Data	Překmit [°C]	Doba ustálení [s]	Doba odezvy [s]
TIA PORTAL	0,32	2632	1652
SIMULACE	0,41	2044	1190

Tab. 3 Parametry regulačního děje

## 5.5 Diagnostika fuzzy PSD regulátoru

Aby byla zaručena funkčnost fuzzy PSD regulátoru, tak je nutné provést základní diagnostiku daného systému.

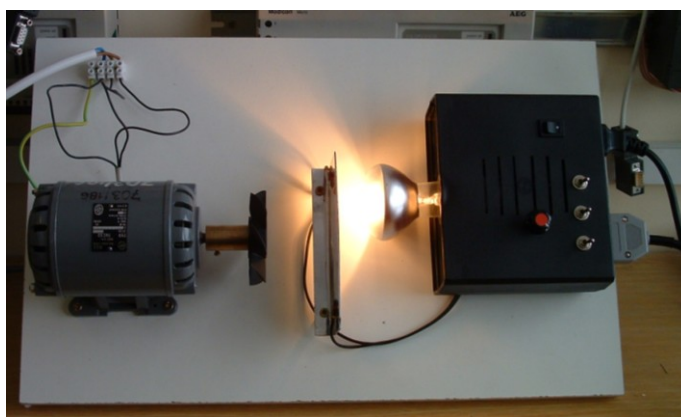
První případ diagnostiky byl pro rozpojený regulační obvod, kdy nepřicházel signál ze snímače teploty. Logicky fuzzy PSD regulátor generoval na výstupu nulové hodnoty.

Nakonec byla nastavena perioda vzorkování na hodnotu nižší než je 14 s. V TIA portalu bylo zjištěno, že pro  $T_{vz} = 5$  s se na vstupech  $\Delta e$  a  $\Delta^2 e$  fuzzy PSD regulátoru během přechodového děje objevují nulové hodnoty, což vede k chybné funkci PLC.

## 6. Testování fuzzy PSD regulátoru Takagi-Sugeno na tepelné soustavě s chlazením v prostředí Matlab/Simulink

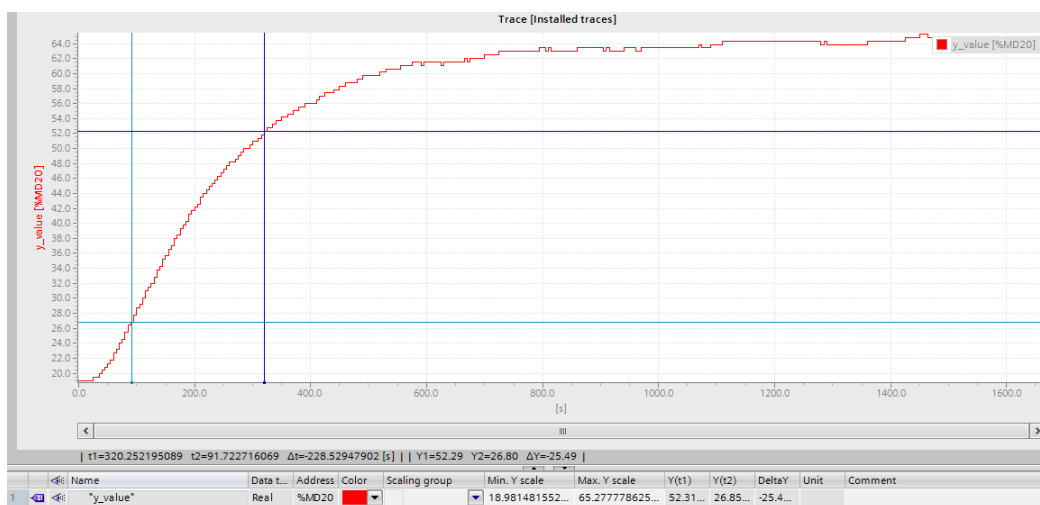
### 6.1 Zjištění přenosu tepelné soustavy pro ohřev

Pro další testování fuzzy PSD regulátoru typu Takagi-Sugeno byla zvolena úloha s tepelnou soustavou s chlazením. Na obr. 27 je znázorněn regulační obvod sestávající se z regulovaného zdroje tepla (zdrojem tepla je žárovka) a chlazení (zdrojem chlazení je vrtulka připojena na rotor asynchronního motorku).



Obr. 27 Foto regulačního obvodu

Základem zjištění přenosu tepelné soustavy pro ohřev je změřit hodnoty regulované veličiny v čase. Po přivedení jednotkového skoku na vstup regulované soustavy - zapnutí žárovky (pozn.: při vypnutém motorku) a změření hodnot na výstupu byla pomocí funkce Trace změřena následující charakteristika [7]:



Obr. 28 Průběh regulované veličiny v čase



Postup výpočtu přenosu tepelné soustavy je následující:

a) Nejdříve je nutné určit zesílení. Zesílení je dáno jako poměr rozdílu teplot a rozdílu napětí. Celkové zesílení vychází:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{65,3 - 19}{10 - 0} = 4,63$$

b) Pro hodnotu  $0,72y(\infty)$ :

$$\Delta v = v_{\text{stop}} - v_{\text{start}} = 65,3 - 19 = 46,3^\circ\text{C}$$

$$0,72 \cdot \Delta v = 0,72 \cdot 46,3 = 33,3^\circ\text{C} \rightarrow \text{výsledek} = 19 + 33,3 = \underline{52,3^\circ\text{C}}$$

se odečte z přechodové charakteristiky časový okamžik  $t_1$  (Obr.28) a vypočte součet časových konstant  $T_1$  a  $T_2$  podle vztahu:

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564} = \frac{320,25}{1,2564} = \underline{254,9}$$

c) Dále se vypočte časový okamžik  $t_2$  podle vzorce:

$$t_2 = 0,3574 \cdot (T_1 + T_2) = 91\text{s}$$

d) Z grafu přechodové charakteristiky se odečte hodnota  $y(t_2)$  (Obr. 28). V hodnotě  $y(91) = 26,8$  je po přepočtu na rozsah 0 až 1 hodnota 0,17.

e) Podle tabulky 1 se určí poměr časových konstant  $\tau_2$ , kde

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} = 0,538$$

f) Ze známého součtu a poměru časových konstant se vypočte  $T_1$  a  $T_2$ :

$$T_1 + T_2 = 254,9$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 0,538$$

$$T_1 = \underline{89,2} \text{ a } T_2 = \underline{165,7}$$

Po dosazení za symbolické proměnné vychází následující přenos (regulační člen):

$$G(s) = \frac{4.63}{(165.7 \cdot s + 1) \cdot (89.2 \cdot s + 1)}$$

## 6.2 Zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru pro ohřev

U fuzzy PSD regulátoru byly pro danou soustavu pomocí algoritmu pidtune a následně pomocí rychlostního algoritmu fuzzy PSD regulátoru (pro  $T_{vz} = 17s$ ) zjištěny následující hodnoty váhových koeficientů:

$$K_e^{PSD} = \underline{\underline{0.004}}$$

$$K_{\Delta e}^{PSD} = \underline{\underline{0.042}}$$

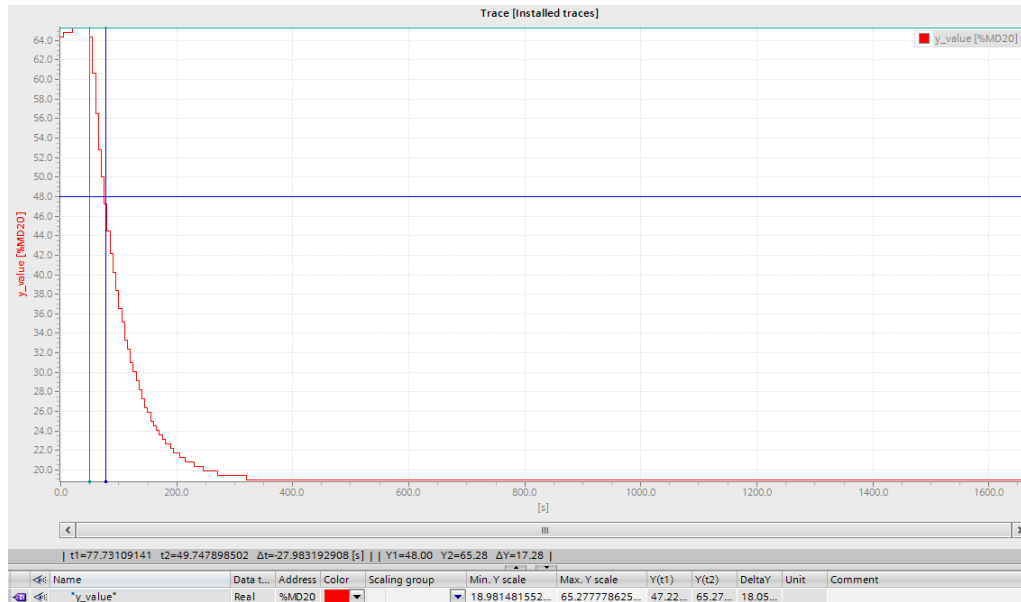
$$K_{\Delta^2 e}^{PSD} = \underline{\underline{0.095}}$$

$$K_{\Delta u}^{PSD} = \underline{\underline{10}}$$

Zesílení výstupu je zde volitelné.

## 6.3 Zjištění přenosu tepelné soustavy pro chlazení

Po přivedení jednotkového skoku na vstup regulované soustavy - zapnutí motorku (pozn.: při vypnutí žárovce) a změření hodnot na výstupu byla pomocí funkce Trace změřena následující charakteristika [7]:



Obr. 29 Průběh regulované veličiny v čase

Jako neznámý parametr přenosu chlazení je časová konstanta  $\tau$ , kterou je možné pro systém 1.řádu stanovit jako dobu, kdy dosahuje přechodová charakteristika 63% ustálené měřené teploty. V daném případě vychází  $\tau=28\text{s}$ . Přenos vychází následovně:

$$G(s) = \frac{-4.63}{28 \cdot s + 1}$$

## 6.4 Zjištění váhových konstant fuzzy PSD regulátoru pro chlazení

U fuzzy PSD regulátoru byly pro danou soustavu pomocí algoritmu pidtune a následně pomocí rychlostního algoritmu fuzzy PSD regulátoru (pro  $T_{vz} = 3\text{s}$ ) zjištěny následující hodnoty váhových koeficientů:

$$K_e^{PSD} = \underline{\underline{-0.006}}$$

$$K_{\Delta e}^{PSD} = \underline{\underline{-0.03}}$$

$$K_{\Delta^2 e}^{PSD} = \underline{\underline{0.0}}$$

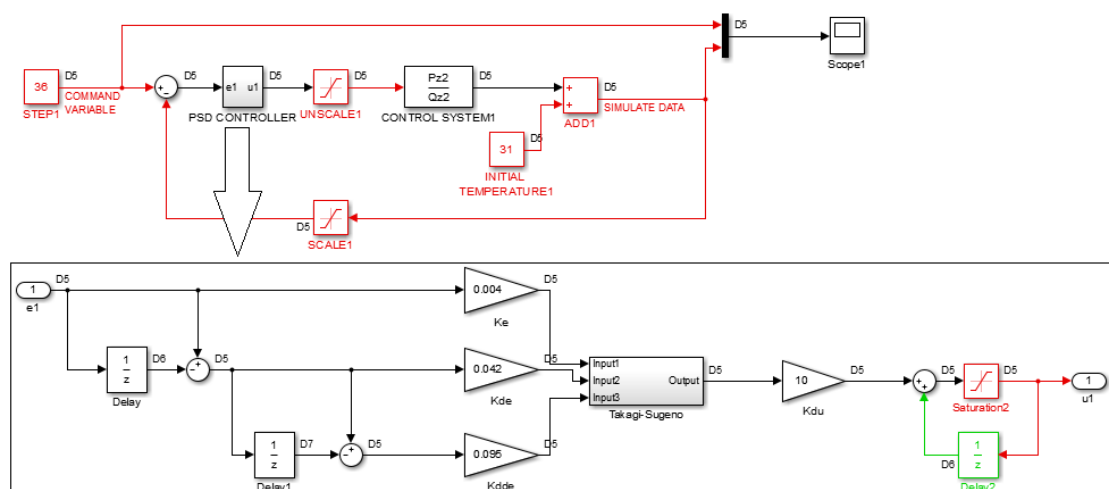
$$K_{\Delta u}^{PSD} = \underline{\underline{10}}$$

Zesílení výstupu je zde volitelné.

## 6.5 Fuzzy PSD regulátor typu Takagi-Sugeno

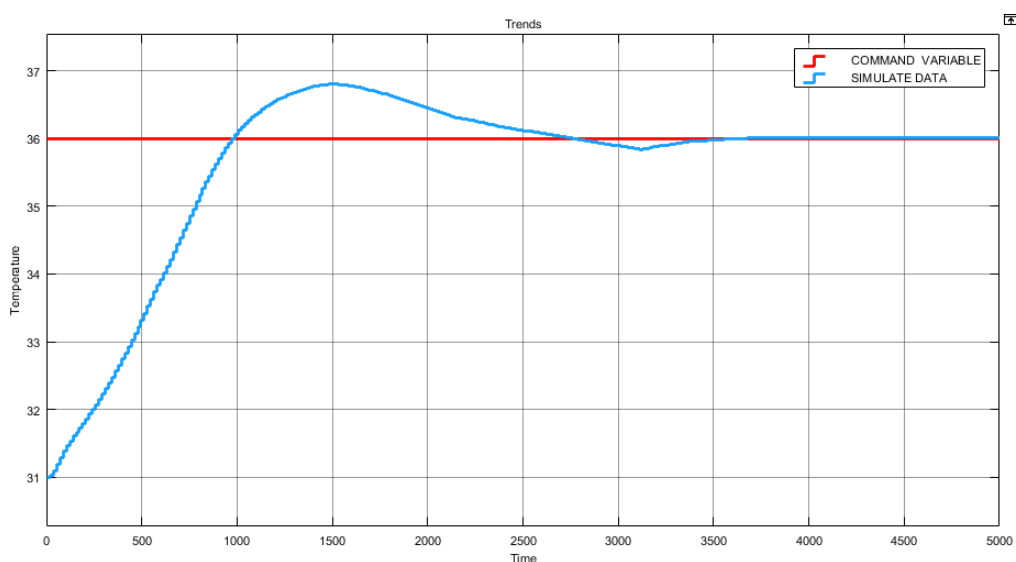
Nastavení báze dat fuzzy PSD regulátoru pro ohřev a fuzzy PSD regulátoru pro chlazení odpovídá nastavení popsanému v kapitole 4.3.

Po naplnění báze dat se přistoupí k návrhu schéma. Schéma regulačního obvodu a vnitřní struktura fuzzy PSD regulátoru pro ohřev je znázorněna na obr. 30. Na obr. 30 lze vidět označení D5 s periodou vzorkování 17s, D6 s periodou vzorkování 34s a D7 s periodou vzorkování 51s.



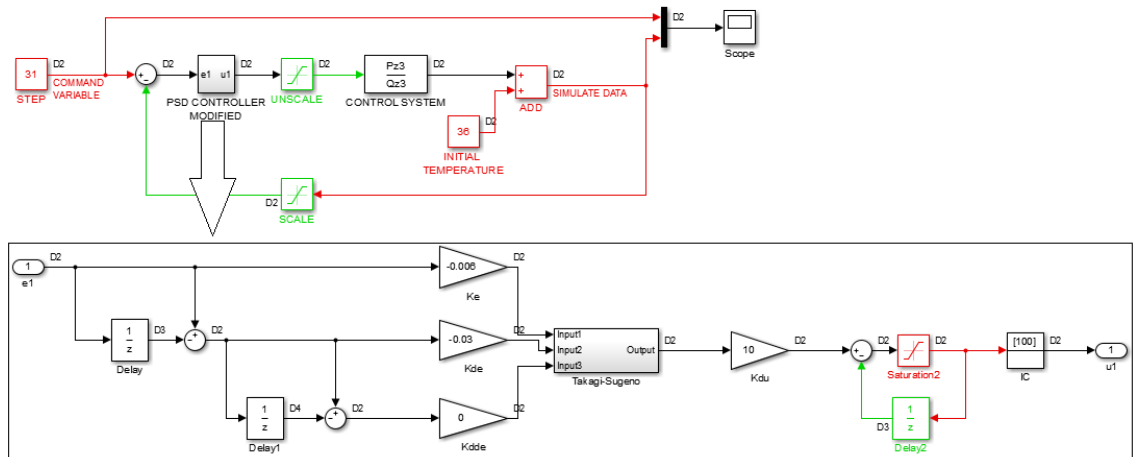
Obr.30 Schéma regulačního obvodu tepelné soustavy pro ohřev

Nakonec se musí nastavit simulace pomocí fixního kroku s krokem auto (automatická vzorkovací perioda) a spustí se simulace (obr.31).



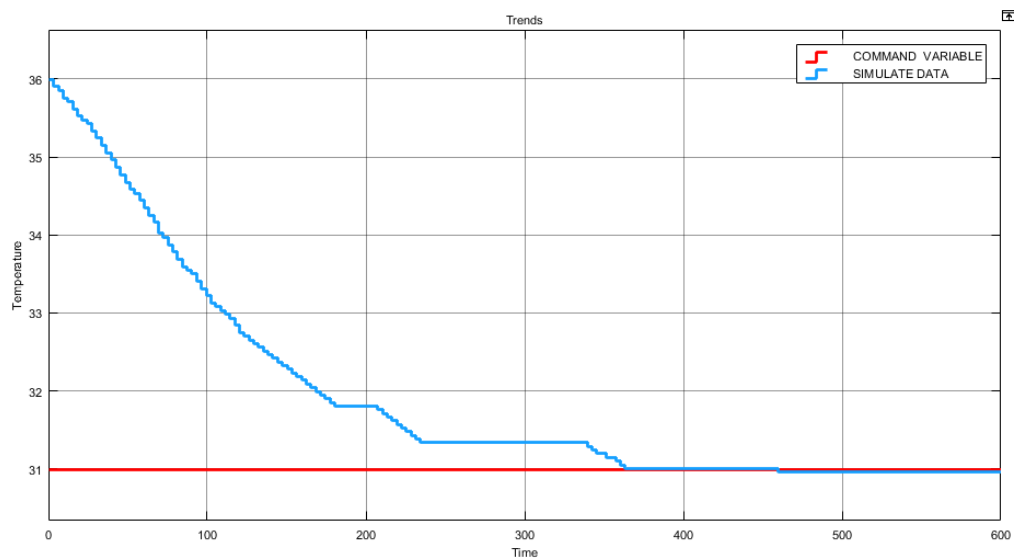
Obr. 31 Průběh teploty tepelné soustavy s chlazením - fáze ohřevu

Schéma regulačního obvodu a vnitřní struktura fuzzy PSD regulátoru pro chlazení je znázorněna na obr. 32. Na obr. 32 lze vidět označení D2 s periodou vzorkování 3s, D3 s periodou vzorkování 6s a D4 s periodou vzorkování 9s.



Obr.32 Schéma regulačního obvodu tepelné soustavy pro chlazení

Po nastavení simulace pomocí fixního kroku s krokem auto (automatická vzorkovací perioda) a spuštění simulace vychází následující průběh (obr.33).



Obr. 33 Průběh teploty tepelné soustavy s chlazením - fáze chlazení

## 7. Testování fuzzy PSD regulátoru Takagi-Sugeno na tepelné soustavě s chlazením v prostředí TIA portal

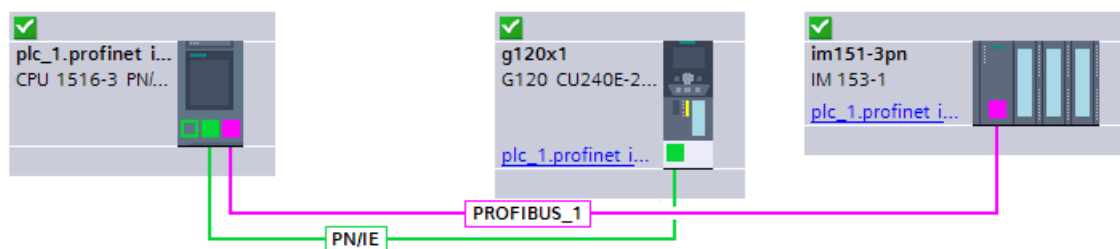
### 7.1 Popis programovacího prostředí SINAMICS StartDrive (TIA portal)

SINAMICS StartDrive představuje bezproblémovou integraci pohonů do prostředí TIA portal. Umožňuje snadné nastavení pohonů přes grafické rozhraní integrované v TIA portal a integraci motorů SIMOTICS [9].

### 7.2 HW konfigurace

Součástí HW konfigurace je PLC S7-1500, ke kterému jsou připojeny digitální a analogové vstupy/výstupy (popis jednotlivých slotů se nachází v kapitole 5.2). HW konfigurace dále obsahuje měnič SINAMICS G120 CU240E-2 PN s výkonovou jednotkou PM340 IP20, který je k PLC připojen pomocí rozhraní PROFINET.

V neposlední řadě je k PLC pomocí rozhraní PROFIBUS připojena periférie ET200M IM151-3 PN.



Obr. 34 Schéma komunikace

### 7.3 Program

Program pro regulaci teploty tepelné soustavy s chlazením je nutné umístit do bloku cyklického přerušení, který umožňuje spustit programy v pravidelných intervalech a to nezávisle na cyklickém provádění programu (intervaly se definují ve vlastnostech OB). Bloky cyklického přerušení se označují OB30 až 38. Program se dělí na 3 organizační bloky pro ohřev (OB30, OB31 a OB32). V OB30 se vykonává hlavní program s periodou vzorkování  $T=17s$ . OB31 se vykonává s periodou 34s a generuje odchylku  $e(k-1)*T$  a  $y(k-1)*T$  a OB32 se vykonává s periodou 51s a generuje odchylku  $e(k-2)*T$ . Následují další 3 organizační bloky pro chlazení (OB33, OB34 a OB35). V OB33 se vykonává hlavní program s periodou vzorkování  $T=3s$ . OB34 se vykonává s periodou 6s a generuje odchylku  $e(k-1)*T$  a  $y(k-1)*T$  a OB35 se vykonává s periodou 9s a generuje odchylku  $e(k-2)*T$ . Programy v OB30 a OB33 obsahují 7 sítí popsanými v kapitole 5.3. Dále bylo nutné vygenerovat hlavní organizační blok s názvem OB1, který obsahuje funkční blok pro ovládání měniče. Pro měniče SINAMICS G Siemens

doporučuje ovládání pohonu prostřednictvím standardního telegramu 352, jehož struktura je následující [10]:

Telegram	352	Význam
Adresy	Řídicí slova	
13,12	STW1	Uvedení do provozu
14	NSOLL A	Nastavení rychlosti

Tab. 4 Využitá část telegramu 352 v programu

M13.0	Bool	Zapnutí / vypnutí měniče
M13.1	Bool	1
M13.2	Bool	1
M13.3	Bool	1
M13.4	Bool	1
M13.5	Bool	1
M13.6	Bool	Start řízení otáček
M13.7	Bool	Kvitování chyby
M12.2	Bool	1 Řízení prostřednictvím PLC
M12.3	Bool	Změna směru otáčení

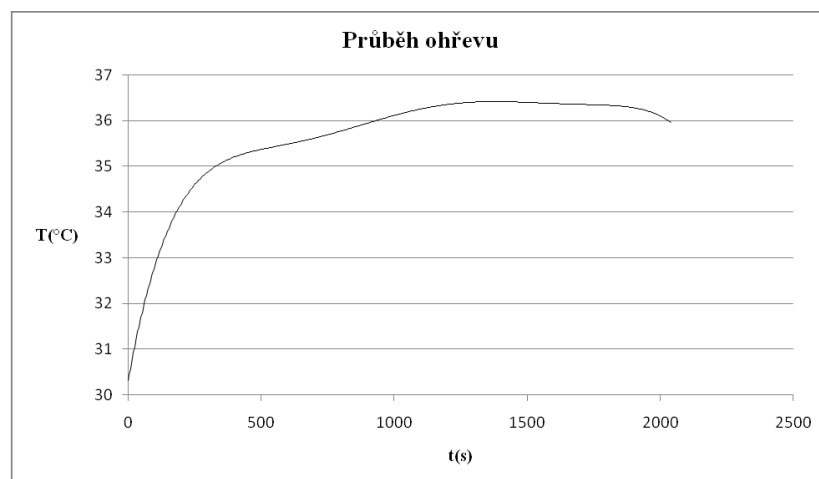
Tab. 5 Složení řídicího slova STW1

Pozn.: 4. sloupec v Tab. 5 s vepsanou jedničkou na začátku znamená, že je nutné dané bity před zapnutím měniče aktivovat a až poté je možné spustit měnič.

## 7.4 Porovnání průběhů regulované veličiny

### Fáze ohřevu

Po úspěšné kompilaci a nahrání programu do PLC vychází pro počáteční teplotu rovnu 31°C a žádanou hodnotu rovnu 36°C následující interpolovaná charakteristika:



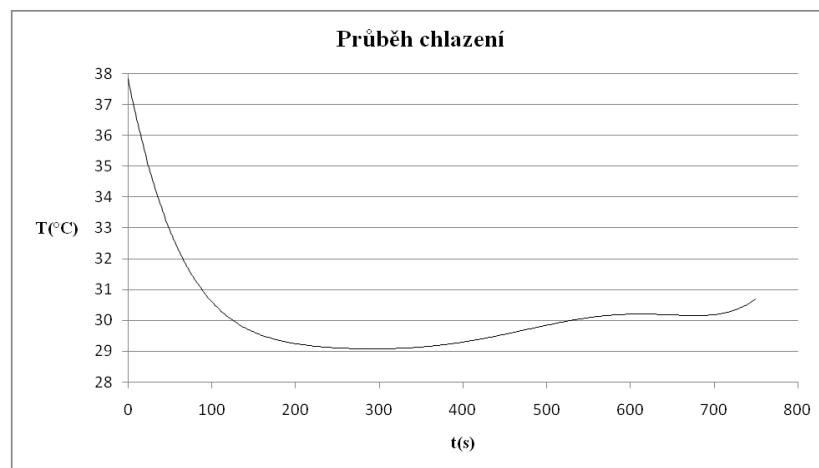
Obr. 35 Přechodová charakteristika tepelné soustavy s chlazením - fáze ohřevu

Fáze ohřevu		
Data	Překmit [°C]	Doba odezvy [s]
TIA PORTAL	1	1000
SIMULACE	0,8	1000

Tab. 6 Porovnání reálných a simulovaných dat - fáze ohřevu

#### Fáze chlazení

Pro počáteční teplotu rovnu 36°C a žádanou hodnotu rovnu 31°C vychází následující interpolovaná charakteristika:



Obr. 36 Přechodová charakteristika tepelné soustavy s chlazením - fáze chlazení

Fáze chlazení		
Data	Podkmit [°C]	Doba ustálení [s]
TIA PORTAL	2	500
SIMULACE	0,2	500

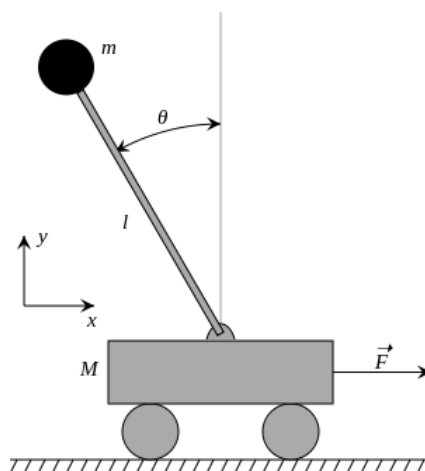
Tab. 7 Porovnání reálných a simulovaných dat - fáze chlazení



## 8. Testování expertního systému Takagi-Sugeno na inverzním kyvadle v prostředí Matlab/Simulink

Expertní systém je založen na znalostech experta (operátora), který je schopen popsat danou technologii. Je to počítačový systém, který napodobuje rozhodovací schopnost experta.

Expertní systémy jsou navrženy tak, aby řešili složité problémy reprezentované *if-then* pravidly. Expertní systém je navrhován pro model inverzního kyvadla. Inverzní kyvadlo je nestabilní kyvadlo otočně upevněné pod svým těžištěm (obr. 37).



Obr. 37 Model inverzního kyvadla

### 8.1 Identifikace modelu inverzního kyvadla

Model inverzního kyvadla lze popsat pomocí následujících pohybových rovnic:

Základ tvoří pohybová rovnice ve tvaru:

$$L = E_{k1} + E_{k2} + E_p \quad (1)$$

, kde  $E_{k1}$  je kinetická energie vozíku,  $E_{k2}$  je kinetická energie kyvadla a  $E_p$  je potenciální energie kyvadla. Pro jednotlivé energie platí:

$$E_{k1} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_1^2$$

$$E_{k2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_2^2$$

$$\cos(\varphi) = \frac{h}{l} \Rightarrow h = l \cdot \cos(\varphi)$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot l \cdot \cos(\varphi)$$

Po dosazení energií do rovnice (1) dostávám:

$$L = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \dot{\varphi}^2 + m \cdot g \cdot l \cdot \cos(\varphi) \quad (2)$$

Pro rychlost vozíku  $v_1$  a rychlost kyvadla  $v_2$  platí:

$$v_1^2 = \dot{x}^2 \quad (2)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{h}{l} \Rightarrow h = l \cdot \cos(\varphi)$$

$$\sin(\varphi) = \frac{a}{l} \Rightarrow a = l \cdot \sin(\varphi)$$

$$x = x - a = x - l \cdot \sin(\varphi)$$

$$y = l \cdot \cos(\varphi)$$

$$v_x = \frac{d}{dt} x$$

$$v_y = \frac{d}{dt} y$$

$$v_2^2 = (v_x)^2 + (v_y)^2 = \left( \frac{d}{dt} (x - l \cdot \sin(\varphi)) \right)^2 + \left( \frac{d}{dt} (l \cdot \cos(\varphi)) \right)^2 \quad (3)$$

Úprava rovnice 3:

$$x(t), \varphi(t)$$

$$\left( \frac{d}{dt} (x - l \cdot \sin(\varphi)) \right)^2 = (\dot{x} - l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi))^2 = \dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \cos(\varphi)^2$$

$$\left( \frac{d}{dt} (l \cdot \cos(\varphi)) \right)^2 = (-l \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin(\varphi))^2 = l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi)^2$$

$$\begin{aligned} v_2^2 &= \dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \cos(\varphi)^2 + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi)^2 = \\ &= \dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot (\cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2) = \underline{\underline{\dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2}} \end{aligned}$$

Dosažením rychlostí  $v_1^2$  a  $v_2^2$  do rovnice 2 dostanu:

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{x}^2 - 2 \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2) + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \dot{\varphi}^2 + m \cdot g \cdot l \cdot \cos(\varphi) \\
 L &= \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}^2 - m \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \dot{\varphi}^2 + m \cdot g \cdot l \cdot \cos(\varphi) \\
 L &= \frac{1}{2} \cdot (M + m) \cdot \dot{x}^2 - m \cdot \dot{x} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \dot{\varphi}^2 + m \cdot g \cdot l \cdot \cos(\varphi) \quad (4)
 \end{aligned}$$

Pro rovnice pohybu platí následující rovnice:

Rovnice pro dráhu vozíku:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} &= F(5) \\
 z = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} &= (M + m) \cdot \dot{x} - m \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) \\
 \frac{d}{dt} z &= \frac{d}{dt} ((M + m) \cdot \dot{x} - m \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos(\varphi)) = (M + m) \cdot \ddot{x} - m \cdot l \cdot \ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + m \cdot l \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) \\
 \text{dosažením} &\Rightarrow (5): \\
 (M + m) \cdot \ddot{x} - m \cdot l \cdot \ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) + m \cdot l \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi) &= F(6)
 \end{aligned}$$

Rovnice pro úhel kyvadla:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= 0(6) \\
 z = \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} &= -m \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \cos(\varphi) + m \cdot l^2 \cdot \dot{\varphi} + J \cdot \dot{\varphi} \\
 \frac{d}{dt} z &= \frac{d}{dt} (-m \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \cos(\varphi) + m \cdot l^2 \cdot \dot{\varphi} + J \cdot \dot{\varphi}) = -m \cdot l \cdot \ddot{x} \cdot \cos(\varphi) + m \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi} + m \cdot l^2 \cdot \ddot{\varphi} + J \cdot \ddot{\varphi} \\
 \frac{\partial L}{\partial \varphi} &= m \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi} - m \cdot g \cdot l \cdot \sin(\varphi) \\
 \text{dosažením} &\Rightarrow (6): \\
 (-m \cdot l \cdot \ddot{x} \cdot \cos(\varphi) + m \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi} + m \cdot l^2 \cdot \ddot{\varphi} + J \cdot \ddot{\varphi}) - (m \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \sin(\varphi) \cdot \dot{\varphi} - m \cdot g \cdot l \cdot \sin(\varphi)) &= 0(7)
 \end{aligned}$$

Po úpravě pohybových rovnic 6 a 7 vychází:

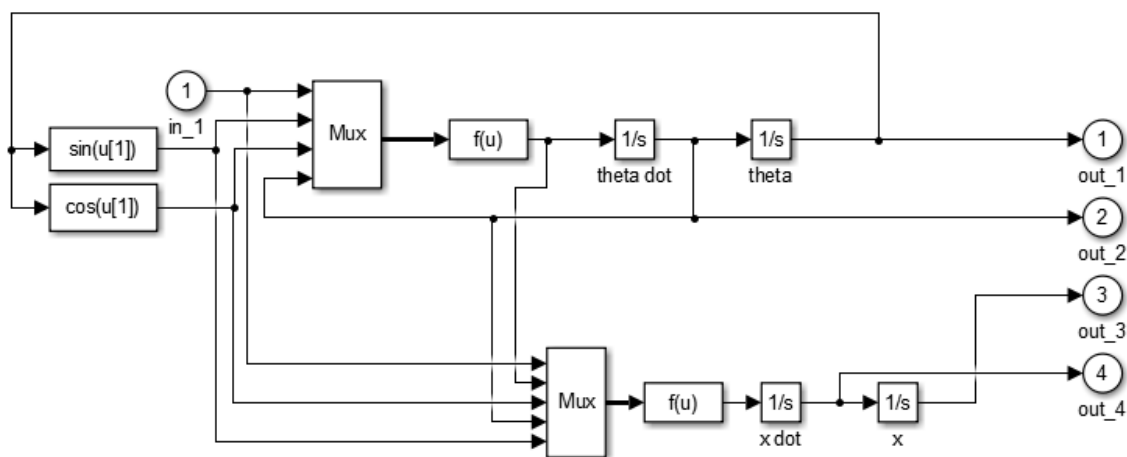
Rovnice pro zrychlení vozíku:

$$\ddot{x} = \frac{F + m \cdot l \cdot (\ddot{\varphi} \cdot \cos(\varphi) - \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi))}{M + m} \quad (8)$$

Rovnice pro úhlové zrychlení kyvadla:

$$\ddot{\varphi} = \frac{-g \cdot \sin(\varphi) + \left( \frac{F - m \cdot l \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin(\varphi)}{M + m} \right) \cdot \cos(\varphi)}{l \cdot \left( \frac{4}{3} - \frac{m \cdot \cos^2(\varphi)}{M + m} \right)} \quad (9)$$

, kde m: hmota kyvadla, J: moment setrvačnosti vzhledem k ose otáčení, l: vzdálenost mezi těžištěm a osou otáčení, M: hmota vozíku, F: urychlovací síla,  $\varphi$ : úhel kyvadla, x: poloha vozíku a g: gravitační zrychlení.



Obr. 38 Model inverzního kyvadla v Simulinku

## 8.2 Adaptivní neuro-fuzzy inferenční systém (ANFIS)

ANFIS je druh umělé neuronové sítě, která je založena na Takagi-Sugeno inferenčním systému. Její inferenční systém koresponduje s nastavením fuzzy if-then pravidel, které mají schopnost aproximovat nelineární funkce.

Součástí FUZZY TOOLBOXu je struktura ANFIS, která může být použita pro návrh neuro-fuzzy regulátoru Takagi-Sugeno.

Vstupními parametry pro ANFIS jsou:

trnData: trénovací data, která jsou ve tvaru matice (pro FIS strukturu s N vstupy, trnData má N+1 sloupců, kde prvních N sloupců obsahuje vstupní data a poslední sloupec obsahuje výstupní data).

Trénovací data se získají po regulaci dané soustavy LQR regulátorem.

numMFs: počet funkcí příslušnosti vstupů.

mfType: typ funkce příslušnosti vstupů (např. typy trojúhelníkové, lichoběžníkové atd.)

in\_fismat: vstupní FIS matice (in\_fismat = genfis(trnData, numMFs, mfType)).

Výstupními parametry pro ANFIS jsou:

epoch\_n: počet trénovacích cyklů.

dispOpt = zeros (1, 4);

out\_fismat: výstupní FIS matice (out\_fismat = anfis(trnData, in\_fismat, 20, dispOpt);).

writefis: generování FIS souboru (writefis(out\_fismat, 'fis1');)

### 8.3 Fuzzy expertní systém typu Takagi-Sugeno

Jako řešení návrhu fuzzy expertního systému byl zvolen návrh pomocí ANFISu. Báze pravidel fuzzy expertního systému pro 3 funkce příslušnosti je následující:

Pravidlo 1: *If x je NS prod  $\dot{x}$  je NS0 prod  $\phi$  je NS1 prod  $\dot{\phi}$  je NS2 then F je  $u_1$ ;*

⋮

Pravidlo 81: *If x je PS prod  $\dot{x}$  je PS0 prod  $\phi$  je PS1 prod  $\dot{\phi}$  je PS2 then F je  $u_{81}$ ;*

Nyní se přistoupí k naplnění báze dat navrženého fuzzy expertního systému typu Takagi-Sugeno.

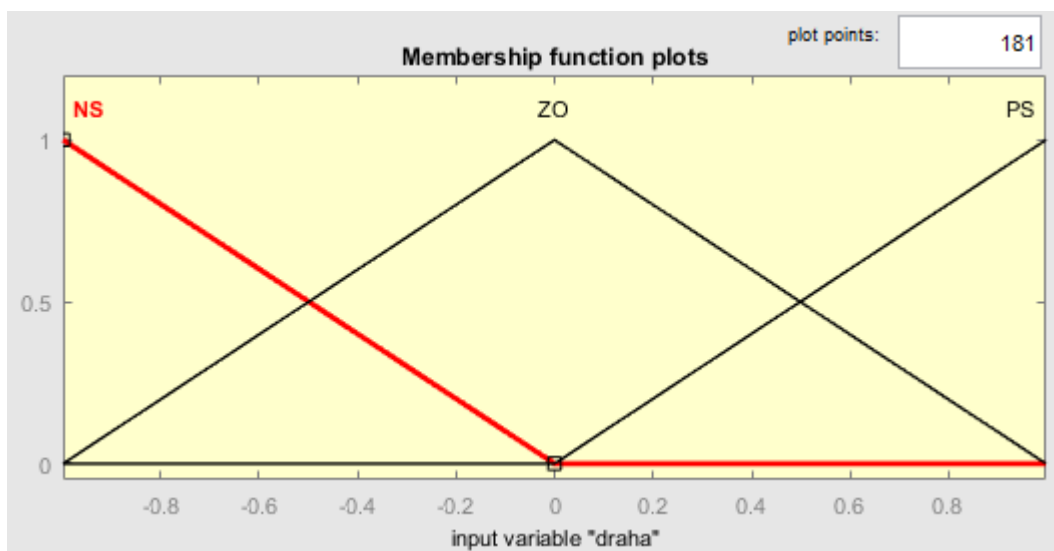
Nejdřív se musí nadefinovat množství funkcí příslušnosti, zde bylo zvoleno 3. Dále se nadefinují vstupní funkce příslušnosti pro čtyři vstupy X0, X1, X2 a X3. Základem je trojúhelníková funkce.

Nastavení např. pro vstup X0 (dráhu) je následující:

NS je trojúhelníková funkce s parametry: a=-1.996, b=-0.9983, c=-0.9983 a d=-0.000403.

ZO je trojúhelníková funkce s parametry: a=-0.9983, b=-0.000403, c=-0.000403 a d=0.9975.

PS je trojúhelníková funkce s parametry: a=-0.000403, b=0.9975, c=0.9975 a d=1.995.



Obr. 39 Funkce příslušnosti vstupu - dráhy

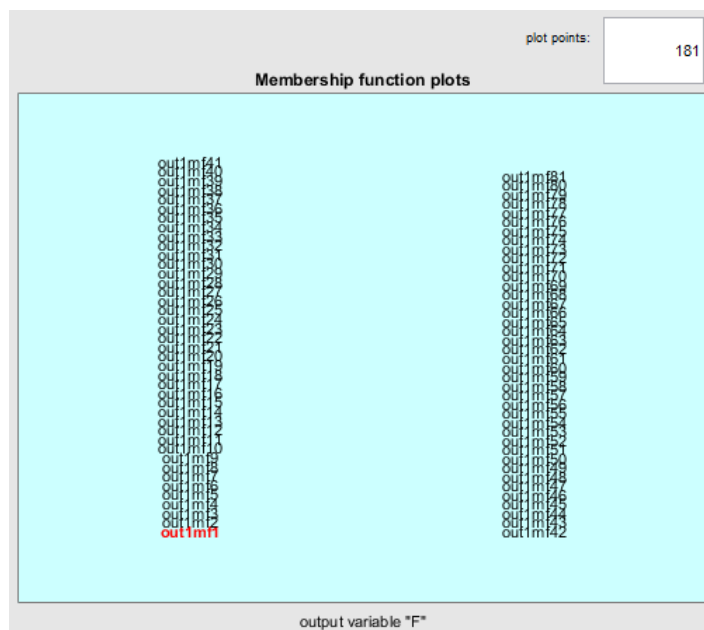
Dále je nutné definovat funkce příslušnosti výstupu Y. Tomu odpovídá následující nastavení výstupních funkcí příslušnosti:

Nastavení Takagi-Sugeno:

$$u_I = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + 0 \cdot X_3 + 0;$$

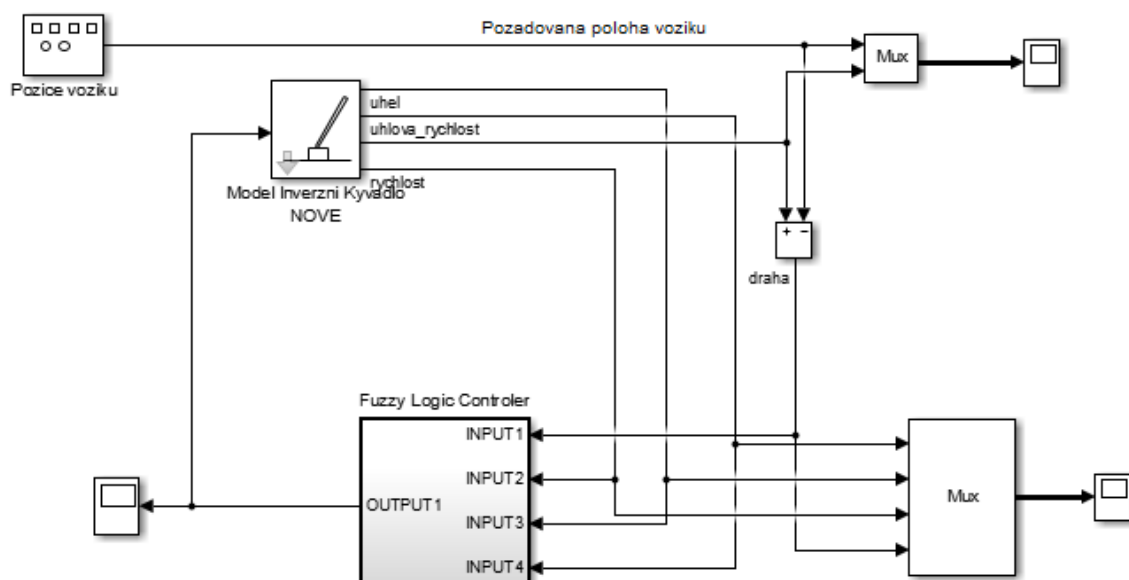
$$u_{4I} = 0.5727 \cdot X_0 - 0.7428 \cdot X_1 - 0.1574 \cdot X_2 + 0.1666 \cdot X_3 + 0.3834;$$

$$u_{8I} = 0 \cdot X_0 + 0 \cdot X_1 + 0 \cdot X_2 + 0 \cdot X_3 + 0;$$



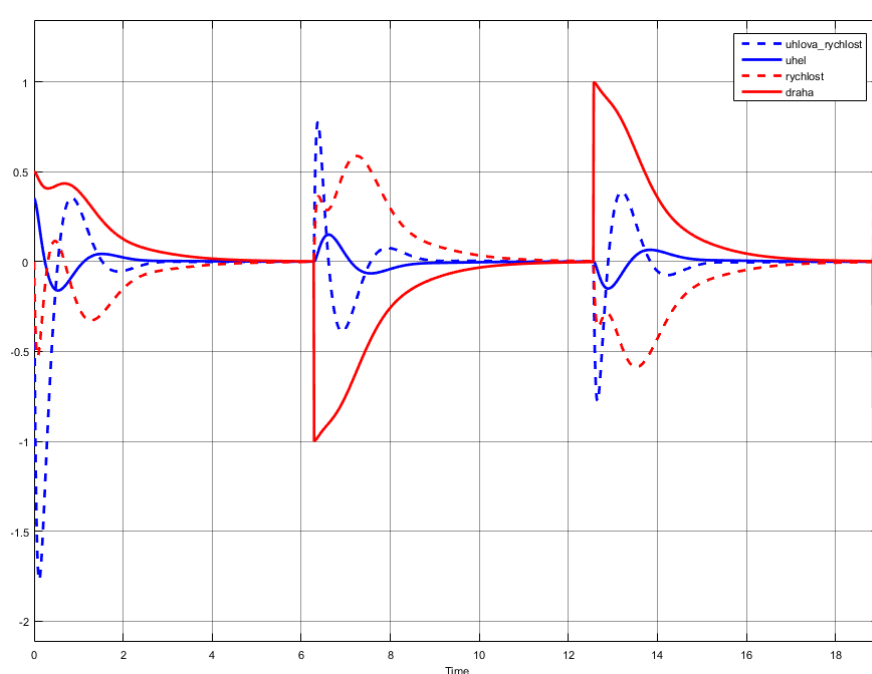
Obr. 40 Funkce příslušnosti výstupu - síly

Nastavením rozsahu Y se nastaví maximální rozsah regulované veličiny, v našem případě je roven:  $[-14.3 \ 14.3]$ . Po naplnění báze dat se přistoupí k návrhu schéma. Schéma regulačního obvodu inverzního kyvadla je znázorněno na obr. 41.



Obr. 41 Schéma regulačního obvodu inverzního kyvadla v Simulinku

Nakonec se musí nastavit simulace pomocí fixního kroku s krokem 0.01 (vzorkovací perioda) a spustí se simulace (obr. 42).



Obr. 42 Průběhy úhlu, uhlové rychlosti, dráhy a rychlosti inverzního kyvadla v Simulinku

## **9. Testování expertního systému Takagi-Sugeno na inverzním kyvadle v prostředí B&R Automation Studio**

### **9.1 Vývojové prostředí B&R Automation Studio V3.0.81**

B&R Automation Studio je integrované softwarové prostředí, které obsahuje nástroje pro všechny fáze projektu, tzn. regulátor, pohon, komunikace a vizualizace mohou být nakonfigurovány v jednom prostředí. Automation Studio podporuje programovací jazyky normy IEC 61131-3 a ANSI C, které mohou být kombinovány dle potřeby. Všechny programovací jazyky mají přístup ke stejným datovým typům a používají stejné knihovny a proměnné [11].

### **9.2 HW konfigurace**

Součástí HW konfigurace je PLC B&R System 2005, ke kterému je připojen komunikační modul, I/O modul a čítačový modul.

#### **PLC B&R System 2005**

Zvolený typ procesoru programovatelného automatu je CPU 3CP360-2 jehož technické parametry jsou následující: procesor Pentium 266, obsahuje 32 MB datové paměti a 512 kB systémové paměti, podporuje rozhraní 1x USB, 1x RS232, 1x Ethernet.

#### **Komunikační modul**

Zvolený typ komunikačního modulu je 3IF786 jehož technické parametry jsou: rozhraní IF1 (RS232, konektor 9-pin, přenosová rychlost 115.2 kBit/s), rozhraní IF2 (Ethernet POWERLINK, konektor RJ45, přenosová rychlost 100 MBit/s).

#### **I/O modul**

Zvolený typ I/O modulu je 3DM476, který obsahuje 16 digitálních vstupů a 16 digitálních výstupů (24VDC).

#### **Čítačový modul**

Zvolený typ čítačového modulu je 3NC150 a obsahuje 2 čítačové kanály (vstupní frekvence 100 kHz) a 2 analogové výstupy ( $\pm 10V$ , 12 bit).

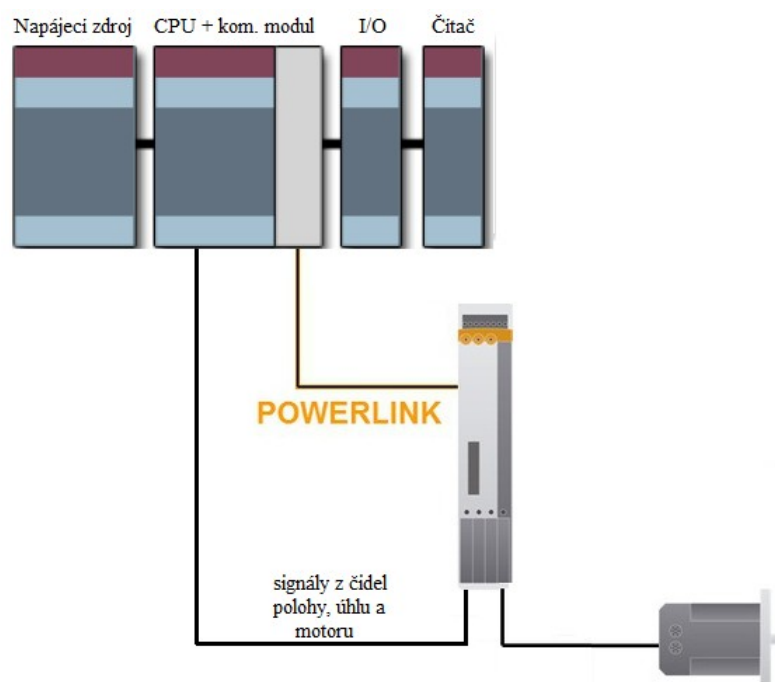


## Pohon inverzního kyvadla

Pohonem inverzního kyvadla je 3-fázový synchronní motor B&R s označením 8MSA3L.R0-30. Jako zpětná vazba pro získávání informace o aktuální pozici je u těchto motorů použit enkodér typu Resolver. Mezi hlavní parametry daného servopohonu patří rychlost otáčení (min. 3000 ot./min., max. 12000 ot./min.) a moment.

## Servozesilovač

Zvolený typ servozesilovače je ACOPOS 1022, který je určen k řízení synchronních i asynchronních motorů s napájecím napětím 3x400V.



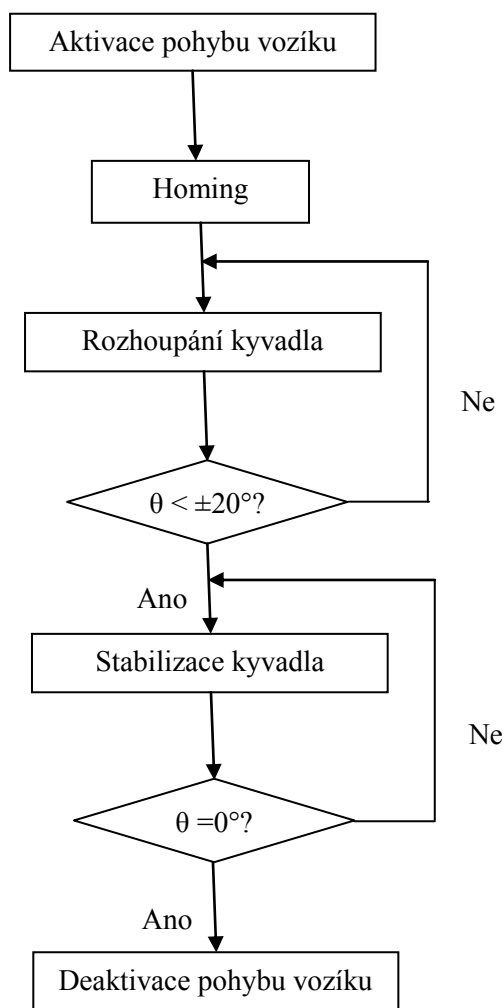
Obr. 43 Schéma komunikace

## 9.3 Program

### Program v Automation studiu (zkr. AS)

Program v prostředí Automation studia sestává z tasku PohonCyclic.ld, který slouží k řízení servopohonu a tasku UhelCyclic.ld, který získává data z enkóderu, na kterém je umístěno kyvadlo a upravuje je pro použití informace o výchylce ramene. PohonCyclic.ld se skládá z bloku pro zápis aktuální hodnoty polohy vozíku, bloku pro zapnutí měniče, bloku pro provedení homingu vozíku, bloku pro pohyb vozíku z jedné krajní polohy do druhé, který slouží pro výšvih ramene kyvadla do vertikální polohy, bloků pro čtení aktuální pozice a rychlosti vozíku, bloku pro regulaci inverzního kyvadla pomocí fuzzy expertního systému a bloků, zajišťujících

spuštění regulace inverzního kyvadla při dodržení stanovených podmínek. Celý algoritmus by se dal shrnout do následujícího diagramu [12]:



Obr. 44 Diagram pro regulaci inverzního kyvadla

### Program v Promoticu

OPC je standardizovaná specifikace rozhraní pro aplikace, které jsou zaměřeny na řízení a monitorování rychlých procesů.

Nastavení OPC v prostředí AS:

- nejdříve se vytvoří v logickém zobrazení OpcTag.opct, ve kterém se přidávají nové tagy.
- dále se přejde do oblasti z pohledu konfigurace, kde se vytvoří mapovací soubor s názvem OpcMap.opcm. Vytváří se to v online režimu AS, proto se mi automaticky nastaví IP adresa PLC. Když se otevře mapovací soubor, tak se přejde zpět do logického zobrazení, označí se OpcTag.opct a přetáhne se do OpcMap.opcm.

## 10. Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh fuzzy systému pro programovatelný automat S7-1500. Konkrétně pak fuzzy systému typu Takagi-Sugeno, určeného k fuzzy regulaci a expertnímu řízení. V první části byl proveden rozbor fuzzy systémů, které může uživatel využívat buď jako expertní systémy (v daném případě může uživatel např. použít první vstup navržený pro teplotu, druhý vstup navržený pro tlak a třetí vstup navržený pro hladinu a pomocí daných vstupů ovládat na výstupu ventil) nebo fuzzy regulátory (v daném případě může uživatel využívat navržený fuzzy regulátor jako PSD regulátor, popř. pokud se násobí jeden ze vstupů nulovou hodnotou, tak je možné použít navržený fuzzy regulátor jako P, PS nebo PD regulátor).

V druhé části jsou popsány navržené funkční bloky fuzzy systémů a je zde popsán proces generování strukturovaného textu pomocí Simulink PLC kodéru.

V další části je popsán proces identifikace tepelné soustavy od přivedení jednotkového skoku na vstup soustavy až po vykreslení přechodové charakteristiky a určení neznámých parametrů  $K$ ,  $T_1$  a  $T_2$  přenosu soustavy (z průběhu přechodové charakteristiky bylo jasné, že se jednalo o aperiodický člen 2.řádu, proto byl zvolen daný přenos). Dále je zde popsáno určení váhových konstant podle vzorců a pomocí genetického algoritmu.

Pátá kapitola obsahuje popis z testování fuzzy PSD regulátoru a jeho diagnostiky. Z regulace pomocí fuzzy PSD regulátoru na reálné soustavě vyplývá, že průběh svými dynamickými vlastnostmi odpovídá správnosti nastavení váhových konstant a tudíž se přenos po identifikaci tepelné soustavy shoduje s přenosem na reálné soustavě.

Šestá kapitola obsahuje proces identifikace tepelné soustavy s chlazením a nastavení váhových konstant pomocí vzorců, které je v porovnání s nastavením váhových konstant pomocí genetického algoritmu vhodnější použít z důvodu nevýhod, které genetické algoritmy obsahují. Daná kapitola dále obsahuje testování fuzzy PSD regulátoru v prostředí Simulinku, kde byly fáze ohřevu a chlazení rozděleny do dvou schémat, kdy pro každou z fází byl navržen samostatný regulátor s rozdílnými vzorkovacími periodami. Danou soustavu lze také regulovat pomocí jednoho regulátoru, ale v takovém případě je vhodné použít chlazení pouze k urychlení doby ustálení regulované veličiny a zmenšení překmitu.

Sedmá kapitola obsahuje popis programu v prostředí TIA portal, kde bylo nutné podrobněji rozebrat problematiku ovládání měniče pomocí PLC.

Mezi hlavní výhody regulace pomocí fuzzy PSD regulátoru oproti regulaci pomocí konvenčního PID regulátoru patří: snadná možnost zahrnutí expertních znalostí do procesu řízení a fuzzy PSD regulátor je efektivnější v rychlejším dosáhnutí žádané hodnoty (má dobrou odezvu). Naopak hlavní výhodou konvenčního PID regulátoru oproti fuzzy PSD regulátoru je lepší udržování hodnoty regulované veličiny na žádané hodnotě.

Osmá kapitola obsahuje popis a schéma modelu inverzního kyvadla, které je řízeno pomocí PLC od firmy B&R. Je zde popsán návrh fuzzy expertního systému pomocí struktury ANFIS a průběhy ze simulace. Původně měl být fuzzy expertní systém navržen pro ovládání servopohonů pomocí PLC Simatic S7-1500, ale po konzultaci s vedoucím diplomové práce bylo vhodné otestovat daný fuzzy systém na jednom z dalších možných integrovaných vývojových prostředích podporovaných Simulink PLC kodérem.

Devátá kapitola pak v krátkosti obsahuje popis HW konfigurace a popis programu v prostředí Automation studia. Je vhodné doplnit, že k ovládání servopohonů pomocí měničů ACOPOS firma B&R používá funkční bloky standardu PLCopen. V deváté kapitole je také uveden vývojový diagram, který slouží pro snadnější pochopení ovládání inverzního kyvadla pomocí PLC. Bohužel se mi nepodařilo realizovat program do takové podoby, aby spolehlivě pracoval a udržel rameno kyvadla v jeho nestabilní poloze.

Zpracováním této diplomové práce jsem si ověřil mé dosavadní teoretické znalosti a získal nové poznatky, které může v budoucnu univerzita využít při tvorbě podobných projektů. Mimo to jsem díky diplomové práci pronikl do problematiky fuzzy řídicích systémů a mohl si vyzkoušet jejich uvedení do praxe.

Hlavní přínos návrhu fuzzy systému vidím v tom, že je možné jej implementovat do jakéhokoliv prostředí určeného pro programování PLC a umožnit tak jeho rozšíření do průmyslu po celém světě.

## Seznam použité literatury

- [1] *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*. Brno: VUTUM, 2003. ISBN 80-214-2261-0.
- [2] *FROM COMPUTING WITH NUMBERS TO COMPUTING WITH WORDS — FROM MANIPULATION OF MEASUREMENTS TO MANIPULATION OF PERCEPTIONS* [online]. USA: IEEE, 1999 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.cs.berkeley.edu/~zadeh/papers/>
- [3] VYSOKÝ, Petr. *Fuzzy řízení*. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01429-8.
- [4] *Simulink PLC Coder* [online]. 2010 [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/aknihovny/sl-plc-coder/>
- [5] *Embedded MATLAB* [online]. 2010 [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: [http://www2.humusoft.cz/www/archived/pub/matlab/2008/emb\\_mat/index.htm](http://www2.humusoft.cz/www/archived/pub/matlab/2008/emb_mat/index.htm)
- [6] STUDNIČKA, VLADIMÍR. 2010. *GENETICKÉ ALGORITMY – MULTI - CORE CPU IMPLEMENTACE* [online]. Brno [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=33586](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33586). Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. RADOMIL MATOUŠEK, Ph.D.
- [7] Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik: Aproximace přechodových charakteristik s aperiodickým průběhem - Strejcova metoda. *Www.352.vsb.cz: Katedra automatizační techniky a řízení* [online]. Ostrava: není, není [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: [http://www.352.vsb.cz/uc\\_texty/Identifikace/str/metody.htm](http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm)
- [8] *Znalostní systémy řízení* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://rc112.vsb.cz/nowakova/materials/zsr/ZSR.pdf>
- [9] *SINAMICS Getting Started - SINAMICS Startdrive* [online]. Norimberk: Siemens AG, 2015 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: [https://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/engineering-software/startdrive/Documents/Startdrive\\_GettingStarted\\_en-US.pdf](https://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/engineering-software/startdrive/Documents/Startdrive_GettingStarted_en-US.pdf)
- [10] *SINAMICS G120 Frequency converter with CU240B- 2 and CU240E-2 Control Units* [online]. Norimberk: Siemens AG, 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://inverterdrive.com/file/Siemens-CU240B-2-CU240E-2-Manual>
- [11] *B&R Automation Studio Quick Start* [online]. 2003 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: [http://instrumentacionycontrol.net/Descargas/Descargas/B&R/Software\\_de\\_programacion\\_de\\_PLC/IyCnet\\_B&R\\_AutomationStudio\\_QuickStart\\_MASYS2ASQS-E\\_240.pdf](http://instrumentacionycontrol.net/Descargas/Descargas/B&R/Software_de_programacion_de_PLC/IyCnet_B&R_AutomationStudio_QuickStart_MASYS2ASQS-E_240.pdf)
- [12] *PLCopen - Function blocks for motion control* [online]. USA: PLCopen, 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: [http://www.plcopen.org/pages/tc2\\_motion\\_control/downloads/plcopen\\_mc\\_part1\\_v20.pdf](http://www.plcopen.org/pages/tc2_motion_control/downloads/plcopen_mc_part1_v20.pdf)

## **Seznam příloh**

Příloha I.: zdrojové kódy vytvořených aplikací

Příloha II.: pdf soubory

## Příloha III.: parametrizace asynchronního motoru

Otevřená-smyčka/uzavřená-smyčka, typ řízení:

Otevřená-smyčka/uzavřená-smyčka, řídicí operační mód: [0] U/f řízení s lineární charakteristikou

Výchozí nastavení požadované hodnoty / zdroj příkazů:

Makro-pohonná jednotka: [7] FBW / datSetChg

Nastavení pohonu:

IEC / NEMA mot STDs: [0] IEC-motor (50 Hz, jednotky SI);

Hnací zdroj napětí: 230V

Pohonná jednotka aplikace: [0] Zatížení, pracovní cyklus s vysokým přetížením pro vektorové pohony

Motor:

Výběr typu motoru: [1] Indukční motor (rotující)

Počet paralelně zapojených motorů: 1

Jmenovité napětí motoru: 380 Vrms

Jmenovitý proud motoru: 0,33 Arms

Jmenovitý výkon motoru: 0,09 kW

Jmenovitý účinník motoru: 0.900

Jmenovitá frekvence motoru: 50,00 Hz

Jmenovité otáčky motoru: 2740,0 rpm

typ chlazení motoru: [0] Bez ventilace

Důležité parametry:

Současný limit: 0,33 Arms

Minimální rychlost: 0,000 rpm

Maximální rychlost: 2740.000 rpm

Náběh motoru: 5.000 s

Doběh motoru: 5.000 s

VYP3 doba doběhu: 0.000 s

Funkce pohonu:

Parametry motoru - identifikace a otáčkové měření: [2] Identifikovat data motoru při stání

Ukončení rychlého uvedení do provozu: Vypočítejte pouze data motoru